

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc.dr. sc. Danko Ćorić

Marin Gobin

Zagreb, 2008.

Sažetak

Ovaj rad ponajprije obrađuje ulogu kidalica i značaj njihova umjeravanja, te je opisana etalonska mjerna oprema i princip njena rada.

Nadalje detaljno je opisan postupak umjeravanja kidalice koji se odvija sukladno normi DIN EN ISO 7500-1.

U praktičnom dijelu rada provedena su umjeravanja kidalice s različito postavljenim dinamometrom s obzirom na aksijalnu os opterećenja. Na temelju provedenih umjeravanja donijeti su odgovarajući zaključci o tome kako položaj dinamometra utječe na promjenu rezultata umjeravanja kidalice.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Uloga kidalica i značaj njihova umjeravanja | 2 |
| 2.1. Osnovne veličine utvrđene na kidalici | 2 |
| 2.2. Statička ispitivanja na kidalicama | 4 |
| 2.2.1. <i>Tlačni pokus.</i> | 5 |
| 2.3. Tipovi kidalice | 7 |
| 2.4. Hidraulične kidalice | 9 |
| 2.5. Značaj umjeravanja kidalica | 11 |
| 2.5.1. <i>Trenutno stanje opreme</i> | 12 |
| 2.5.2. <i>Sljedivost mjerenja</i> | 13 |
| 2.5.3. <i>Mjerna nesigurnost</i> | 15 |
| 3. Etalonski mjerni sustav | 18 |
| 3.1. Etalonski dinamometri | 20 |
| 3.1.1 <i>Opis etalonskog dinamometra Z4</i> | 21 |
| 3.1.2. <i>Mjerne trake</i> | 22 |
| 3.1.3. <i>Konektori (električne instalacije)</i> | 25 |
| 3.2. Mjerna pojačala | 26 |
| 3.2.1. <i>MGCplus pojačalo</i> | 29 |
| 3.3. Mjerenje sile pomoću etalonskog dinamometra i mjernog pojačala | 34 |
| 3.3.1. <i>Princip rada sustava</i> | 34 |
| 3.3.2. <i>Filtriranje signala</i> | 36 |
| 3.3.2.1. <i>Visokopropusni filteri</i> | 37 |
| 3.3.2.2. <i>Niskopropusni filteri</i> | 37 |
| 4. Umjeravanje po normi DIN EN ISO 7500-1 | 39 |
| 4.1. Općenito o normi DIN EN ISO 7500-1 | 39 |
| 4.2. Opis postupka umjeravanja | 39 |
| 5. Eksperimentalni dio | 45 |
| 5.1. Rezultati umjeravanja | 53 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 5.2. Rasprava rezultata umjeravanja | 59 |
| 6. Zaključak | 64 |
| Literatura | 66 |

Popis slika

| | | |
|----------|--|----|
| Slika 1 | Kvalitativni dijagram "naprezanje-sabijanje" za a) sivi lijev; b) opći konstrukcijski čelik ; c) olovo | 6 |
| Slika 2 | Tipovi kidalica | 7 |
| Slika 3 | Ekstenzimetri u procesu mjerenja | 8 |
| Slika 4 | Prikaz hidraulične (univerzalne) kidalice | 9 |
| Slika 5 | Primjer hidraulične kidalice nazivne sile 2 MN | 10 |
| Slika 6 | Shematski prikaz značajki umjeravanja | 11 |
| Slika 7 | Hijerarhija sljedivosti na nivou države | 13 |
| Slika 8 | Zadaci mjeriteljskih centara u piramidi sljedivosti | 14 |
| Slika 9 | Utjecajni čimbenici pri procjeni mjerne nesigurnosti | 15 |
| Slika 10 | Prikaz metoda procjene mjerne nesigurnosti | 16 |
| Slika 11 | Grafički prikaz dinamičke greške | 18 |
| Slika 12 | Shematski prikaz mjernog sustava i način formiranja dinamičke greške pri mjerenju | 19 |
| Slika 13 | Presjek dinamometra tlačnog (lijevo) i vlačnog (desno) | 20 |
| Slika 14 | Primjeri nekih dinamometara | 21 |
| Slika 15 | Presjek kućišta dinamometra | 22 |
| Slika 16 | Utjecaj deformacije trake na promjenu otpora | 23 |
| Slika 17 | Puni Wheatstone-ov most s 4 mjerne trake | 24 |
| Slika 18 | Konektori i spojna shema | 25 |
| Slika 19 | Različite vrste pojačala | 26 |
| Slika 20 | Karakteristika DC pojačala | 27 |
| Slika 21 | Karakteristika CF pojačala | 28 |
| Slika 22 | Blok dijagram CF pojačala | 28 |
| Slika 23 | Blok dijagram MGCplus sistema (HBM) | 29 |
| Slika 24 | Prikaz modula za spajanje kod jednokanalnog pojačala | 30 |
| Slika 25 | Prikaz razmještaja elemenata MGCplus-a | 31 |

| | | |
|----------|--|----|
| Slika 26 | Promjena signala u mjernom sustavu | 35 |
| Slika 27 | Usporedba karakteristika visokopropusnog i niskopropusnog filtera | 37 |
| Slika 28 | Karakteristika Butterworth filtera | 38 |
| Slika 29 | Karakteristika Bessel filtera | 38 |
| Slika 30 | Umjeravana kidalica sa upravljačkim uređajem i PC-om | 45 |
| Slika 31 | Prikaz tlačnog opterećivanja dionamometra | 46 |
| Slika 32 | Instrument za mjerenje hrapavosti | 47 |
| Slika 33 | Prenosni tvrdomjer | 48 |
| Slika 34 | Sučelje upravljačkog programa kidalice | 49 |
| Slika 35 | Pojačalo MGCplus | 51 |
| Slika 36 | Prikaz položaja dinamometra kod umjeravanja | 53 |
| Slika 37 | Vrijednosti izlaznog signala za mjerne točke 80 kN i 160 kN | 56 |
| Slika 38 | Vrijednosti izlaznog signala za mjerne točke 240 kN i 320 kN | 57 |
| Slika 39 | Vrijednosti izlaznog signala za mjernu točku 400 kN | 58 |
| Slika 40 | Relativno odstupanje stvarne sile uslijed izmicanja dinamometra mjereno u uzlaznim nizovima | 60 |
| Slika 41 | Relativno odstupanje stvarne sile uslijed izmicanja dinamometra mjereno u silaznim nizovima | 61 |
| Slika 42 | Relativna greška točnosti po mjernim točkama za različite pomake dinamometra | 62 |
| Slika 43 | Relativna greška ponovljivosti po mjernim točkama za različite pomake dinamometra | 63 |
| Slika 44 | Relativna greška histereze po mjernim točkama za različite pomake dinamometra | 63 |

Popis tablica

| | | |
|-----------|---|----|
| Tablica 1 | Kombinacije mjernih traka i pripadajući moduli | 32 |
| Tablica 2 | Karakteristike modula ML38 | 33 |
| Tablica 3 | Veličine pri umjeravanju kidalice | 40 |
| Tablica 4 | Karakteristične vrijednosti sustava za mjerenje sile | 41 |
| Tablica 5 | Izmjerene vrijednosti hrapavosti tlačnih ploča | 47 |
| Tablica 6 | Izmjerene vrijednosti tvrdoće tlačnih ploča | 48 |
| Tablica 7 | Vrijednosti izlaznog signala kod preopterećenja | 52 |
| Tablica 8 | Rezultati umjeravanja za različite položaje dinamometra | 54 |
| Tablica 9 | Vrijednosti relativnih grešaka kidalice | 59 |

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

| | | |
|----------------------------|-------------------|---|
| ΔL | mm | produljenje epruvete |
| L | mm | duljina epruvete nakon djelovanja sile |
| L_0 | mm | početna mjerna duljina epruvete |
| F | N | stvarna sila očitana na etalonu za rastući niz sile |
| S_0 | mm ² | površina presjeka epruvete |
| σ | N/mm ² | naprezanje |
| ε | mm/mm | istežanje |
| E | N/mm ² | Youngov modul elastičnosti |
| R_e | N/mm ² | granica razvlačenja |
| R_m | N/mm ² | vlačna čvrstoća |
| R_{et} i R_{mt} | N/mm ² | granica stlačivanja i tlačna čvrstoća |
| $R_{p0,01}$ ili $R_{p0,2}$ | N/mm ² | konvencionalna granica razvlačenja |
| A | % | istezljivost |
| Z | % | kontrakcija |
| d_0 | mm | početni promjer epruvete |
| $U(x)$ | % | mjerna nesigurnost |
| u_A i u_B | % | mjerne nesigurnosti tipa A i tipa B |
| u_c | % | ukupna mjerna nesigurnost |
| U | % | proširena mjerna nesigurnost |
| k_m | | faktor prekrivanja |
| $x_i(t)$ | | izmjerena veličina |
| $x(t)$ | | stvarna veličina |
| E_{din} | | dinamička greška |
| k | | konstanta, faktor osjetljivosti mjernih traka |
| ΔR | Ω | promjena otpora |
| R_0 | Ω | električni otpor nedeformirane trake |
| U_A, U_{signal} | V | napon mjernog signala |
| U_b | V | napon napajanja |

| | | |
|--|----------|---|
| R_{line} | Ω | otpor duljine vodiča |
| U_{line} | V | pad napona u vodiču |
| R_b | Ω | ukupni otpor Wheatstone-ova most |
| U_{senzor} | V | napon kompenzacijske grane |
| f_g | Hz | prekidna frekvencija |
| f_T | Hz | noseća frekvencija |
| a | % | relativna rezolucija pokazivača sile kidalice |
| b | % | relativna greška ponovljivosti sustava za mjerenje sile |
| f_0 | % | relativna greška nule sustava za mjerenje sile |
| F'' | N | stvarna sila očitana na etalonu za opadajući niz sila |
| F_C | N | stvarna sila očitana na etalonu za dopunski niz rastućih sila u najmanjem mjernom području |
| F_i | N | sila očitana na pokazivaču sile kidalice za rastući ispitni niz |
| F_i'' | N | sila očitana na indikatoru sile kidalice za opadajući niz sila |
| \bar{F}_i, \bar{F} | N | aritmetičke srednje vrijednosti nekoliko mjerenja sile F_i i F na istoj mjernoj točki |
| F_{imax}, F_{imin} F_{max}, F_{min} | N | maksimalna i minimalna vrijednost sile F_i i F na istoj mjernoj točki |
| F_{iC} | N | sila očitana na pokazivaču sile kidalice za dopunski niz rastućih sila u najmanjem mjernom području |
| F_{i0} | N | ostatak sile očitana na pokazivaču sile kidalice nakon uklanjanja opterećenja |
| F_N | N | nazivna vrijednost mjernog područja kidalice |

| | | |
|-----------------------|------|---|
| q | % | relativna greška točnosti sustava za mjerenje sile |
| r | N | rezolucija pokazivača sile kidalice |
| v | % | relativna greška reverzibilnosti (histereze) sustava za mjerenje sile |
| X_{REF} | mV/V | referentna vrijednost promjene napona koja odgovara sili F_i |
| X | mV/V | izmjerena vrijednost promjene napona koja odgovara stvarnoj sili F |
| X_{sr} | mV/V | aritmetičke srednje vrijednosti nekoliko mjerenja izlaznog signala na istoj mjeri točki |
| X_{max} i X_{min} | mV/V | najveća i najmanja vrijednost promjene napona izmjerene pri istoj diskretnoj sili |
| X_0 | mV/V | izlazni signal kod predopterećenja |
| X_N | mV/V | izlazni signal kod nazivne vrijednosti |
| pd | mm | udaljenost dinamometra od aksijalne osi opterećenja |
| F_r | % | relativno odstupanje sile |

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći se znanjem i vještinama stečenim u toku studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zahvaljujem se svom mentoru Doc.dr.sc. Danku Ćoriću na svesrdnoj pomoći koji mi je svojim savjetima, znanjem i iskustvom omogućio kvalitetniji pristup i realizaciju ovog rada.

Također zahvaljujem i svim ljudima koji su mi na ovom studentskom putu pomagali, a posebno svojim roditeljima bez čije žrtve i podrške ne bih uspio.

1.Uvod

Umjeravanje i sila jesu ključni pojmovi koji čine okosnicu ovog rada. Rad je fokusiran na umjeravanje mjerila sile, u ovom slučaju kidalice. Mjerni sustav kojim se umjerava kidalica čine mjerno pojačalo i električni dinamometar koji sadrži mjerne trake koje pomoću promjene otpora mjere deformacije, a time i narinuto opterećenje.

Kod umjeravanja svakog mjerila bitno je osigurati sljedivost mjerenja i rezultata prema mjerilu višeg razreda točnosti. Na taj način osigurava se valjanost i međusobnu usporedivost rezultata mjerenja. Kidalice se kao i drugi mjerni uređaji moraju umjeravati u određenim vremenskim intervalima jer se njihova točnost s vremenom smanjuje.

Umjeravanje kidalice provedena su s dinamometrom izmaknutim od aksijalne osi opterećenja kako bi se analiziralo utjecaj položaja dinamometra na rezultate umjeravanja. Dobiveni rezultati su obrađeni i izračunati određeni parametri u vidu pogrešaka mjernog sustava kidalice. Umjeravanja su provedena u laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (skraćeno LIMS) koji djeluje unutar Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. LIMS je nositelj državnih etalona za silu.

2. Uloga kidalice i značaj njihova umjeravanja

Kidalice su uređaji na kojima se ispitni uzorak (epruveta) kontinuirano opterećuje statičkom silom sve do loma kako bi se analiziralo elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog naprezanja. Pri ispitivanju kontinuirano se mjere sila i deformacija epruvete, te se na osnovu tih veličina određuju mehanička svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala.

2.1. Osnovne veličine utvrđene na kidalici

Ukoliko na epruvetu djelujemo vlačnim opterećenjem epruveta se produljuje za iznos ΔL u smjeru u kojem djeluje opterećenje. Ono iznosi:

$$\Delta L = L - L_0, \text{ mm} \quad (1)$$

gdje je L duljina epruvete nakon djelovanja sile, a L_0 početna mjerna duljina epruvete. Omjer sile F kojom se opterećuje epruveta i površine presjeka epruvete S određuje veličinu naprezanja σ :

$$\sigma = \frac{F[\text{N}]}{S[\text{mm}^2]}, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2)$$

$$1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1000000 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

Ovo je općenit izraz za naprezanje. One konkretne vrijednosti naprezanja koje određuju mehaničku otpornost materijala dane su izrazima (5) i (6). Hookeov zakon predstavlja sponu između naprezanja i istežanja u elastičnom području. Naprezanje i deformacija su tenzori drugog reda, ali promatraju se samo aksijalne komponente, pa su prikazani kao skalari.

Hookeov zakon je prikazan sa slijedećim izrazom:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3)$$

gdje su $\varepsilon \left[\frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right]$ istežanje i $E \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$ Youngov modul elastičnosti, konstanta karakteristična za pojedini materijal. Istežanje ili relativno produljenje materijala računa se prema sljedećem izrazu :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Iz prikazanih izraza vidljiva je veza između sile i naprezanja, a preko Hookeovog zakona i veza naprezanja i istežanja koje je opet povezano s produljenjem materijala.

Potrebno je još spomenuti dva karakteristična naprezanja *vlačnu čvrstoću* i *granicu razvlačenja* određena u uvjetima vlačnog opterećenja:.

- granica razvlačenja

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (5)$$

- vlačna čvrstoća

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (6)$$

R_e je naprezanje temeljem kojeg se uz odabrani faktor sigurnosti određuje dopušteno naprezanje u radu strojnog dijela ili elementa konstrukcije. R_m je naprezanje pri maksimalnoj sili i predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na osnovu kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti.

Za materijale koji nemaju jasno izraženu granicu razvlačenja, nego postoji kontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje određuje se konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,01}$ ili $R_{p0,2}$). Prema dogovoru konvencionalna granica razvlačenja predstavlja ono naprezanje koje nakon rasterećenja ostavlja u epruveti izvjesnu malu plastičnu (trajnu) deformaciju iznosa 0,01 % ($R_{p0,01}$) ili 0,2 % ($R_{p0,2}$). Istezljivost A (%) i kontrakcija Z (%) su veličine koje karakteriziraju deformabilnost materijala. Istezljivost A opisuje deformabilnost materijala u uzdužnom smjeru, a kontrakcija Z deformabilnost materijala u smjeru okomitom na smjer opterećenja. [1]

Ako je riječ o tlačnom opterećenju kojem je posvećeno malo više pažnje u slijedećem poglavlju, onda gornjim izrazima odgovaraju karakteristična naprezanja R_{et} i R_{mt} tj. *granica stlačivanja* i *tlačna čvrstoća*.

Dakle da bi se odredile navedene veličine potrebni su uređaji koje nazivamo kidalice ili univerzalne ispitivalice.

2.2. Statička ispitivanja na kidalicama

Statička ispitivanja su ona pri kojem se materijal podvrgava konstantnom ili laganom rastućem opterećenju. Statička ispitivanja koja se provode na kidalicama jesu sljedeća:

- Vlačno ispitivanje
- Tlačno ispitivanje
- Savojno ispitivanje

Ispitivanja se obično obavljaju na epruvetama određenih dimenzija, koje mogu biti okruglog ili četvrtastog presjeka.

Postoji veza između početne mjerne duljine i promjera epruvete kod vlačnog i tlačnog pokusa. Kad je riječ o vlačnom ispitivanju, početna duljina je jednaka peterostrukom (kratka epruveta) ili desetorostrukom (duga epruveta) početnom promjeru d_0 , dok kod tlačnog pokusa ona iznosi $L_0 = (2,5..3)d_0$ kada mjerimo i sabijanje materijala [1].

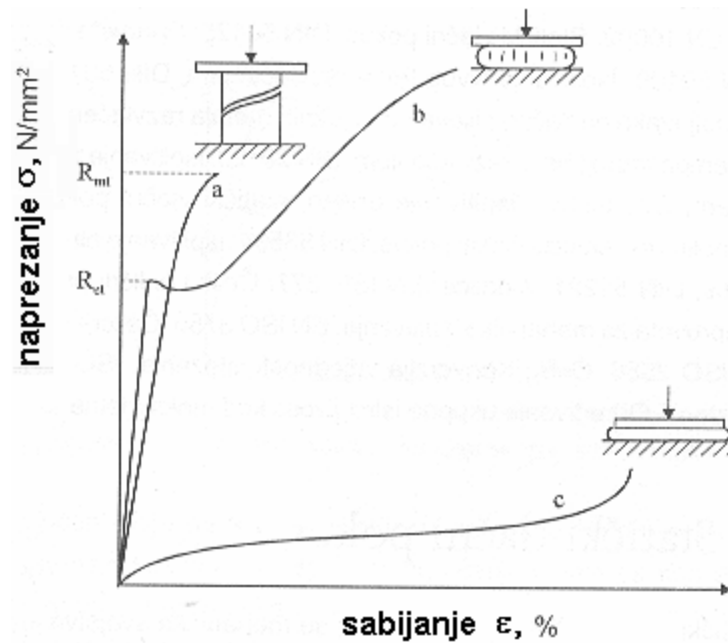
Kod savojnog ispitivanja nema takvih dogovorenih vrijednosti, oblici i dimenzije epruveta ovise o vrsti materijala. Savojnim ispitivanjem utvrđuju se mehanička svojstva prvenstveno krhkih materijala.

S obzirom da se pri umjeravanju kidalice koristilo tlačno opterećenje, svrsishodno je opisati malo opširnije upravo tlačni pokus.

2.2.1. Tlačni pokus

Tlačni pokus je ispitivanje pri kojem se aksijalno tlačno opterećuje ispitni uzorak (materijal) sa namjerom da se utvrde njegova mehanička svojstva. Ovo se ispitivanje provodi ponajprije na materijalima u građevinarstvu (beton, cigla, drvo, keramika), a rjeđe u strojarstvu na polimernim ili metalnim materijalima (materijali za klizne ležajeve, brtvila i sl.).

Ispitivanje se provodi na kidalicama ili prešama koje moraju biti opremljene posebnim tlačnim pločama koje moraju biti tvrđe od materijala koji se ispituje, te kuglasto uležištene kako bi jednoliko prenosile opterećenje na ispitivanu epruvetu [1].



Slika 1. Kvalitativni dijagram "naprezanje-sabijanje" za a) sivi lijev;
b) opći konstrukcijski čelik ; c) olovo [2]

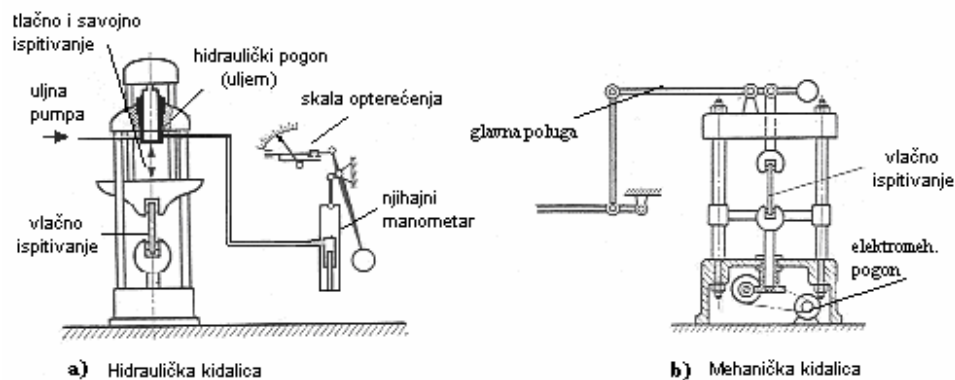
Na slici 1 dan je prikaz dijagram naprezanje-sabijanje za pojedine vrste materijala. U slučaju tlačnog ispitivanja sivog lijeva lom nastaje pri vrijednosti tlačne čvrstoće R_{mt} . Sivi lijev je vrlo krhak materijal koji ima vrlo malu plastičnu deformaciju pa stoga čim materijal uđe u područje elastično-plastičnih deformacija dolazi do loma pri vrijednost maksimalne sile. Kod sivog lijeva nastupa krhki lom koji se javlja pod kutem 45° s obzirom na smjer djelovanja tlačne sile. Druga skupina su žilavi materijali koji prije nego što nastupi lom plastično teku pri vrijednosti granice stlačivanja R_{et} . Tu se materijal prestaje opirati sabijanju i on teče pri konstantnom naprezanju. Treća skupina su izrazito deformabilni materijali (olovo). Svojstvo deformabilnosti materijala pri ovom ispitivanju je *lomno sabijanje*. Ono je relativno skraćenje epruvete u odnosu na njezinu početnu mjernu duljinu [1, 7].

Tlačnim ispitivanjima općenito se određuje sposobnost materijala za oblikovanje plastičnim deformiranjem (na primjer za tehnološke procese: kovanje, valjanje i sl.).

2.3. Tipovi kidalica

Kidalice kako i njihovo samo ime govori, služe za kidanje. Na njima je moguće ostvariti vlačno ili tlačno statičko opterećivanje. Statičko ispitivanje je ono ispitivanje gdje je prirast opterećenja u jedinici vremena takav da je prirast proizvedenog naprezanja u epruveti manji ili jednak $10 \text{ N/mm}^2\text{s}$.

Kidalice susrećemo u različitim laboratorijskim i industrijskim uvjetima. S obzirom na pogon koji koriste, postoje mehaničke i hidrauličke kidalice (slika 2), Služe za eksperimentalno ispitivanje mehaničkih svojstava na epruvetama ili gotovim strojnim dijelovima.



Slika 2. Tipovi kidalica [1]

Kidalice se sastoje od četiri osnovna dijela, a to su: pogonski mehanizam za zadavanje sile, sustav za prenošenje sile, za snimanje ili zapisivanje sile te za mjerenje deformacije [1]. Kod hidrauličkih kidalica slika 2a moguće je i tlačno i vlačno ispitivanje te se stoga ove kidalice nazivaju još i univerzalne kidalice. Kod mehaničkih kidalica, slika 2b, moguće je samo razvlačenje epruvete. Mehaničke kidalice su u stvari elektromehaničke, ali im je prenos sile mehanički. Dakle elektromehanički pogon ostvaruje se pomoću električnog motora, reduktorskog

prijenosa i jednog, dva ili četiri vretena za pomicanje traverze. Različite brzine traverze mogu se postići mijenjanjem brzine vrtnje elektromotora.

Kako se na kidalicama ne određuje samo sila već i pripadajuća deformacija materijala tu su i uređaji koji služe za mjerenje deformacija koje su toliko male da ih se nemože registrirati klasičnim metodama. Ti uređaji nazivaju se ekstenzimetri. Ekstenzimetri mogu biti električni i mehanički [8]. Primjer dva ekstenzimetra dan je na slici 3.



Slika 3. Ekstenzimetri u procesu mjerenja [8]

Kidalice se općenito upotrebljavaju za dobivanje baze podataka o već poznatim materijalima ili za razvoj novih materijala te za održavanje ujednačene kvalitete materijala. Za dobavljače materijala, mehanička svojstva materijala važno su mjerilo kvalitete proizvoda. Dijagrami sila-produljenje odnosno naprezanje-istezanje daju mnogo informacija o ispitivanom materijalu i mogu pomoći u predviđanju njegovog ponašanja tijekom uporabe. [9]

2.4. Hidraulične kidalice

Kod kidalica sa hidrauličnim pogonom ulje pod pritiskom potiskuje klip u cilindru, klip pomiče traverzu pri čemu se epruveta opterećuje vlačnom silom. Vrijednost sile očitava se na skali kidalice.

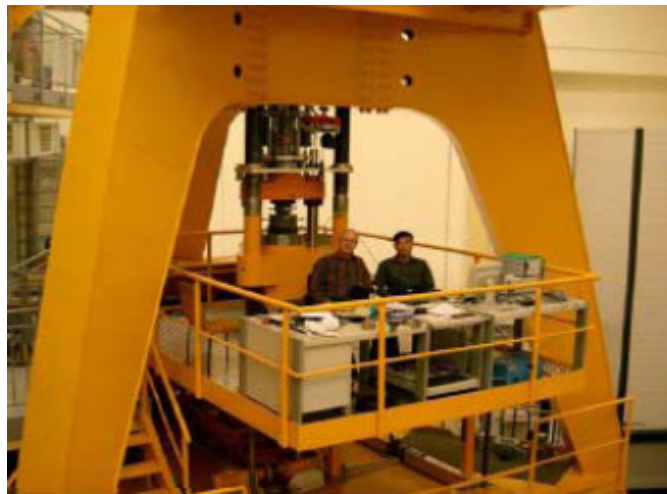
Hidraulične kidalice koriste ili jednoradne, ili dvoradne klipove za pomicanje traverze gore ili dolje. Kod ručno upravljanih strojeva, otvaranjem ventila kontrolira se prirast opterećenja. U hidrauličnim servo sistemima s povratnom vezom, umjeto klasičnog ventila postoji električno upravljani servo-ventil za precizniju regulaciju opterećenja. [9, 10]



Slika 4. Prikaz hidraulične (univerzalne) kidalice [10]

Na slici 4 prikazana je hidraulična kidalica sa svojim standardnim dijelovima: 1- mehanizam za prihvat epruvete, 2- hidraulični cilindar s klipom, 3- hidraulični pogon, 4- pisač, 5- računalo, 6-traverza.

Glavna prednost hidrauličnih kidalica je mogućnost postizanja visokih vrijednosti sila. Jedna od takvih kidalica prikazana je na slici 5. Riječ je o hidrauličnoj kidalici nazivnog opterećenja 2 MN.



Slika 5. Primjer hidraulične kidalice nazivne sile 2 MN

Postoje kidalice na kojima je moguće ostvariti i još veće nazivne sile. Takve kidalice koriste se češće za potrebe ispitivanja u građevinarstvu.

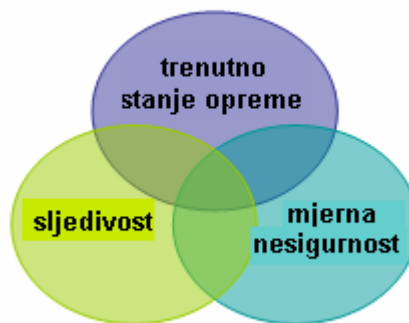
Osim nazivne vrijednosti kod kidalica je i bitno i mjerno područje sile. Što je veći raspon mjernog područja, to je njena primjena šira i time iskoristivost kidalice veća.

2.5. Značaj umjeravanja kidalica

Umjeravanje općenito podrazumjeva uspostavljanje veze između pokazivanja mjerila i pokazivanja etalona. Etalon je materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice neke veličine da bi mogla poslužiti kao referencija [3, 11, 12]. Da bi umjeravanje bilo ispravno i imalo smisla mora biti osigurana sljedivost rezultata, i izražena mjerna nesigurnost [12, 13]. Umjeravati se moraju kako sami mjerni uređaji tako i etaloni s kojima se provodi umjeravanje.

Brojni su razlozi zbog kojih se provodi umjeravanje :

- da bi se odredilo trenutno stanje opreme
- osigurala sljedivost prema nacionalnom standardu
- smanjila mjerna nesigurnost



Slika 6. Shematski prikaz značajki umjeravanja

Na slici 6 shematski je prikazana povezanost različitih čimbenika zbog kojih se provodi umjeravanje. Oni se prožimlju i u pravilu predstavljaju nerazdvojnu cjelinu, te da bi se zadovoljila sljedivost mora se u obzir uzeti mjerna nesigurnost koja je istovremeno odraz trenutnog stanja opreme. [3]

Učestalom uporabom mjerila postepeno gube na točnosti, te je potrebno umjeravati u određenim vremenskim intervalima kako bi se zadovoljili sve stroži

zahtjevi koji se danas postavljaju na točnost mjerenja. Kada je riječ o hidrauličnim kidalicama njihova točnost se može pogoršati zbog smanjenja tlaka ulja u hidrauličnom sustavu što može biti uzrokovano lošom kvalitetom ulja, ali i brtvljenim spojevima koji s vremenom gube svoju funkciju. [12]

Zbog toga je potrebno kidalice umjeravati kako bi zadržale vjerodostojnost, odnosno kako bi rezultati mjerenja bili zaista valjani.

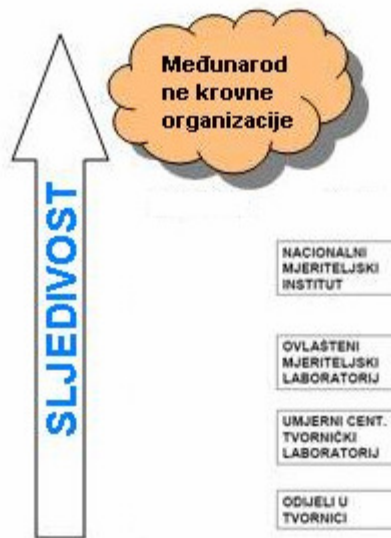
2.5.1. Trenutno stanje opreme

Umjeravanje znači da se izlazni signal neke izmjerene veličine mora registrirati i usporediti sa ulaznim signalom, te iste mjerene veličine. Stanovita odstupanja naravno postoje i očekivana su, samo je pitanje kolika su, da li su prevelika, što je utjecalo na njih, da li su rezultat lošeg rukovanja, istrošenosti opreme ili nečeg drugog. Na temelju rezultata umjeravanja i izračunatih grešaka određuje se klasa točnosti mjerila. Klasa točnosti je interna klasifikacija mjerne opreme pojedinog proizvođača koja daje korisnu informaciju o kvaliteti mjernog uređaja. [3, 4, 5]

Pravilno umjerena kidalica osigurava konzistentnost, primjenjivost i kompatibilnost provedenih ispitivanja, te zato mjerenja moraju biti što točnija i pouzdanija [11]. Stoga se kidalica mora redovno umjeravati, jer tijekom vremena njezine značajke se mijenjaju zbog utjecaja mnogih vanjskih čimbenika, koji se negativno odražavaju na rezultate mjerenja ili čak vode do potpune disfunkcionalnosti mjerila. Svakva takva provjera koja rezultira možebitnim ugađanjem, popravljanjem i/ili zamjenom dotrajalih dijelova predstavlja svojevrsnu garanciju kvalitete mjernog uređaja, a time i usluga kojima je on namjenjen.

2.5.2. Sljedivost mjerenja

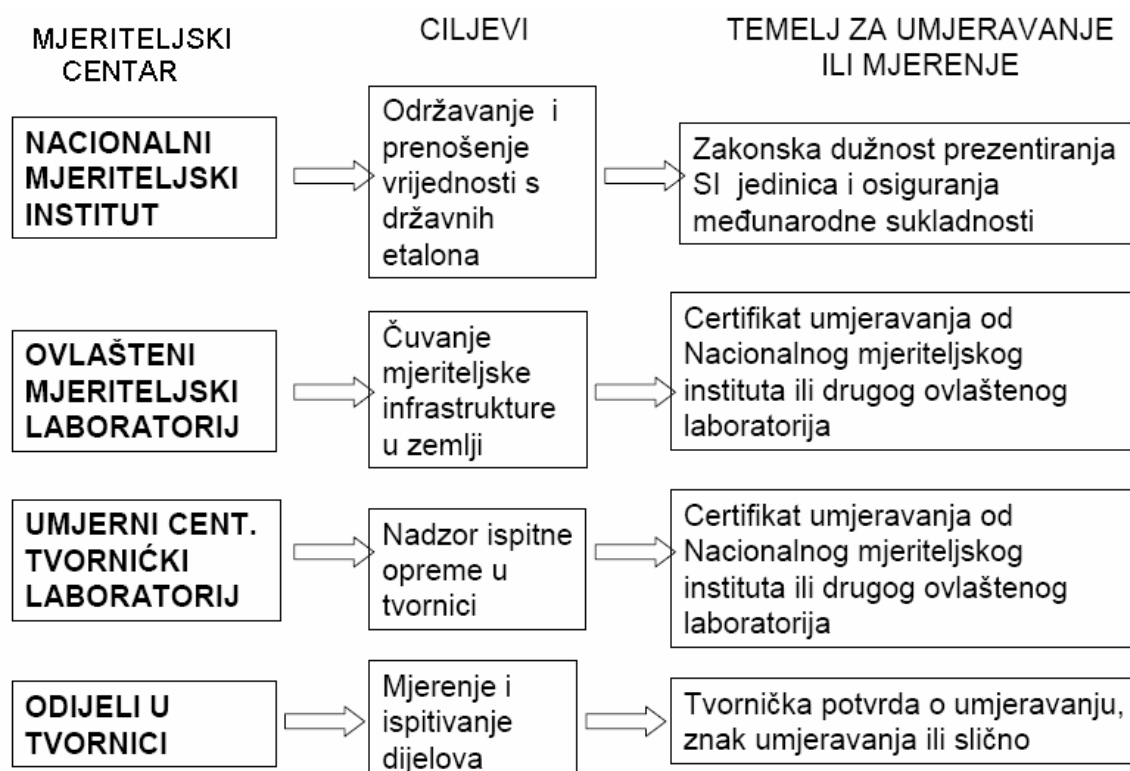
Sljedivost rezultata prema nacionalnim i međunarodnim etalonima znači da su umjeravanja provedena korištenjem opreme koja je umjerena nekim "točnijim" mjerilom, koje je pak umjereno još "točnijim" etalom. Time se ostvaruje neprekinuti lanac usporedbi sve do nacionalnog etalona čime se postiže globalna povezanost rezultata mjerenja, kako bi se oni mogli međusobno uspoređivati i kako bi rezultati različitih laboratorija bili jednako mjerodavni. [14] Rezultati umjeravanja bez iskazane sljedivosti izvan su bilo kakve kontrole, i zapravo nisu valjani. Sljedivost predstavlja hijerarhiju, kako je to prikazano na slici 7.



Slika 7. Hijerarhija sljedivosti na nivou države

Sljedivost prema slici 7 ima smjer prema gore i proteže se sve do nacionalnog mjeriteljskog instituta kao najviše stepenice u ovom lancu. Nakon toga sljede međunarodne krovne organizacije, kao vrh piramide sljedivosti.

U Hrvatskoj nositelj državnih etalona za silu u mjernom području 50 N – 200 kN jest Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (LIMS). Sljedivost njihovih etalona vezuje na nacionalni etalon R. Njemačke čiji je nositelj PTB (Physikalische Technische Bundesanstalt). Primarni etalon za silu ne postoji jer je mjerna jedinica za silu izvedena veličina.



Slika 8. Zadaci mjeriteljskih centara u piramidi sljedivosti [14]

Na slici 8 dan je prikaz ciljeva pojedinih mjeriteljskih jedinica u svrhu osiguranja sljedivosti. Sljedivost počiva na tim zadacima, a na nivou države kao krajnja instanca nalazi se nacionalni mjeriteljski institut čiji je zadatak održavanje i prenošenje vrijednosti s državnih etalona. [14]

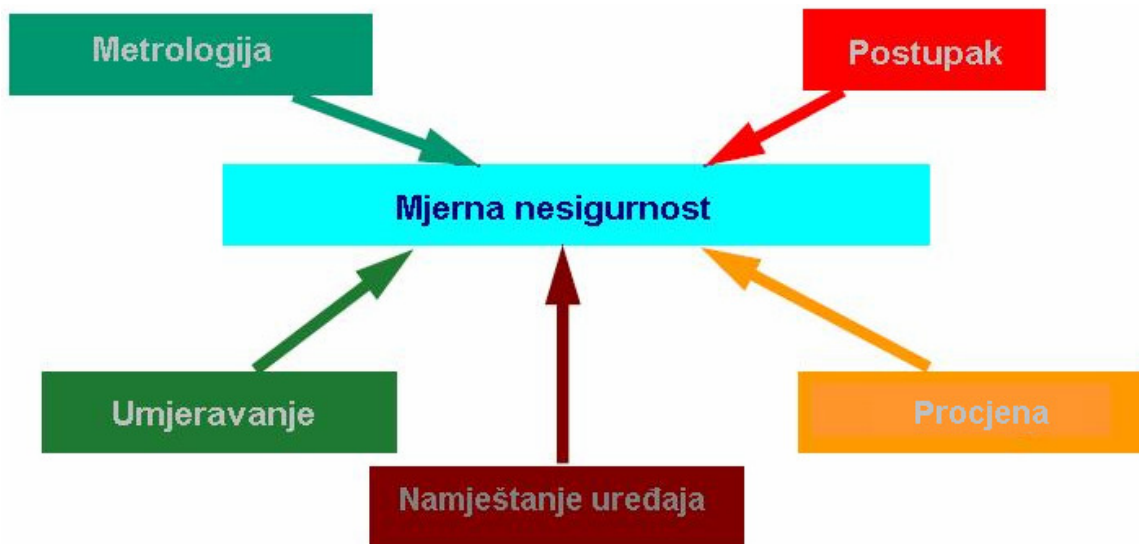
Međunarodno priznati etaloni su krajnji doseg, te je sljedivost upravo povezanost i usporedivost mjernih postupaka i rezultata sa njima. Osiguravanjem sljedivosti osigurava se kvaliteta mjerenja s maksimalnom pouzdanošću i s najmanjom mjernom nesigurnošću.

2.5.3. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost se definira kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini.

Niti jedan rezultat mjerenja nije potpuno siguran (točan) tj. uvijek sadrži grešku veću ili manju što upućuje na potrebu iskazivanja mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost označava se $U(x)$ i opisuje koliko je povjerenje u rezultat mjerenja. Što je manja mjerna nesigurnost to je mjerenje bolje. Minimalna vrijednost mjerne nesigurnosti predstavlja najbolju mjernu sposobnost nekog laboratorija za mjerenja koja provodi. [14]

Na slici 9 prikazani su utjecajni čimbenici koji utječu na mjernu nesigurnost.

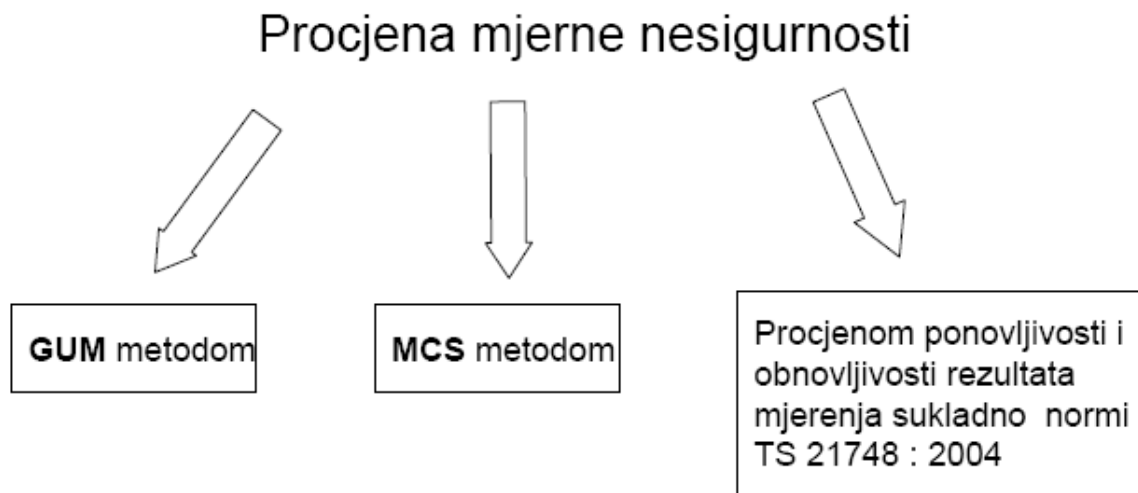


Slika 9. Utjecajni čimbenici pri procjeni mjerne nesigurnosti [3]

Očito da mjerna nesigurnost ovisi o uvjetima koji vladaju u nekom laboratoriju stanju i kvaliteti mjerne opreme, računalnoj programskoj podršci, matematičkim zakonitostima, vremenskim intervalima umjeravanja i još brojnim drugim čimbenicima. Sama oznaka $U(x)$ upućuje na to da je ona funkcija niza različitih

veličina, no nisu svi čimbenici nužno uključeni u procjenu mjerne nesigurnosti u danom trenutku.

Dvije su vrste mjerne nesigurnosti. Jedna je uvjetovana pojavom sistematskih pogrešaka i rezultira smanjenom točnošću rezultata mjerenja, a druga je rezultat slučajnih pogrešaka koje smanjuju pouzdanost. Na slici 10 dana je podjela metoda za procjenu mjerne nesigurnosti. [14]



Slika 10. Prikaz metoda procjene mjerne nesigurnosti [14]

GUM metodom procjenjujemo dvije vrste nesigurnosti: standardne devijacije A vrste odnosno B vrste. Procjena nesigurnosti A vrste temelji se na odgovarajućim statističkim metodama (npr. izračunavanjem standardnog odstupanja srednje vrijednosti mjernog niza). S druge strane procjena nesigurnosti B vrste temelji se na znanstvenom sudu donesenom na osnovu raspoloživih podataka (iskustveni podaci, podaci iz priručnika, podaci prijašnjih mjerenja itd.) [14].

Ukupna mjerna nesigurnost iskazuje se izrazom:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (\%) \quad (7)$$

gdje su u_A i u_B mjerne nesigurnosti tipa A i tipa B. Ukoliko se ukupna mjerna nesigurnost pomnoži sa faktorom prekrivanja k_m , dolazi se do proširene mjerne nesigurnosti:

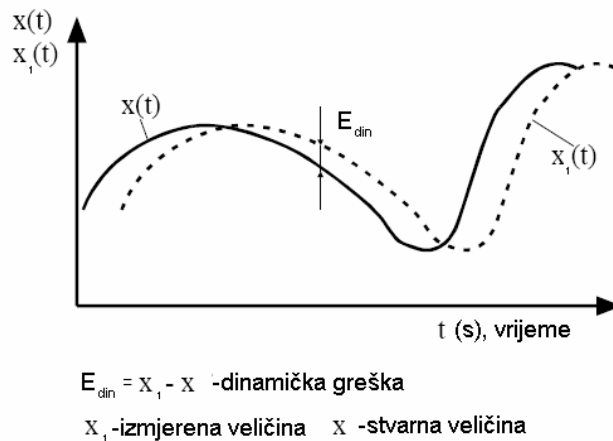
$$U = k_m \cdot u_C \quad (\%) \quad (8)$$

MCS metoda služi za vrednovanje i usporedbu rezultata dobivenih GUM metodom. Također i ova metoda zahtjeva dobru statističku podlogu i dobro poznavanje sustava, njegovih karakteristika, kao i potrebno mjerno iskustvo i znanje. Kod treće metode koristi se standardno odstupanje, a kao osnova procjene su mjere rasipanja, ponovljivost i obnovljivost [14].

3. Etalonski mjerni sustav

Mjerni sustav za mjerenje sile može se podijeliti na etalonski dinamometar, mjerno pojačalo, A/D konverter kao sastavni dio pojačala i osobno računalo za prikupljanje i vizualizaciju rezultata mjerenja. U ovom radu korišten je mjerni sustav kojeg čine prijenosni dinamometar Z4 nazivne sile 500 kN i mjerno pojačalo MGCplus s modulom za pojačanje ML38. I dinamometar i pojačalo proizvod su renomirane tvrtke Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Njemačka. Električni dinamometri općenito rade na principu mjernih traka i piezokristala. Dinamometri s piezokristalima su manji, lakši, i krući ali im je nedostatak veća mjerna nesigurnost i nisu prikladni za statičke aplikacije.

Kod mjernih sustava greške pri mjerenju općenito nastaju iz 2 razloga. Jedan je promjena vrijednosti mjerne veličine tijekom samog mjerenja, a s druge strane greška nastaje i onda kad mjerni uređaj nije u stanju dovoljno brzo pratiti mjerenu veličinu. [8]

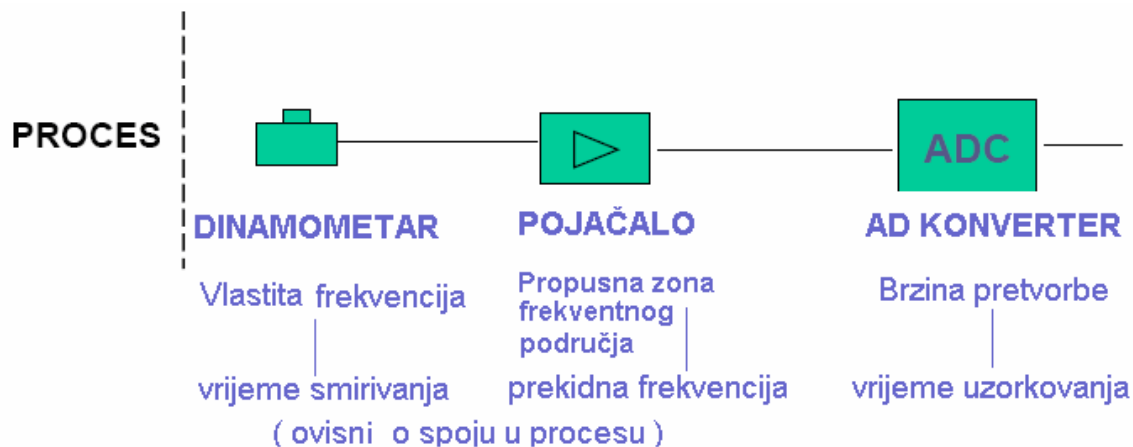


Slika 11. Grafički prikaz dinamičke greške [8]

Na slici 11 su prikazane vremenski ovisne promjene stvarne veličine i izmjerene veličine. U jednom trenutku javlja se razlika između njih i ona se naziva dinamička greška. Ona može biti amplitudna i fazna, a govori o

inertnosti mjernog sustava u odnosu na događaje u procesu. U narednom dijelu je opisano kako pojedina mjerna oprema utječe na pojavu dinamičke greške.

Slika 12 prikazuje mjerni lanac za mjerenje sile i parametre s kojima je mjerni signal u interakciji, a koji utječu na proces mjerenja.



Slika 12. Shematski prikaz mjernog sustava i način formiranja dinamičke greške pri mjerenju [3]

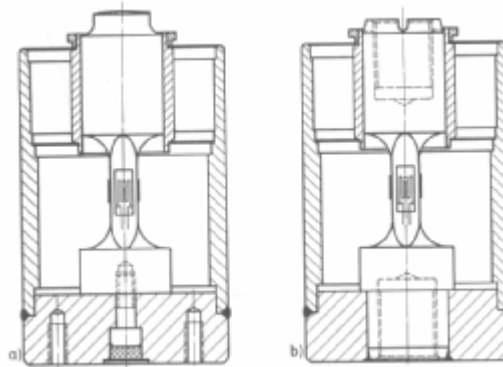
Glavni problem kod ovakvog sustava jest što svaki od sudionika u ovom lancu ima određeno kašnjenje. Najsporiji sudionik najviše utječe na formiranje dinamičke greške mjerenja. Pošto kod dinamometra imamo prirodnu frekvenciju on doprinosi sa svojim vremenom smirivanja isto kao i pojačalo sa svojom prekidnom frekvencijom koja ovisi o analognoj širini frekvencijskog područja. Kod dinamometra bi rješenje bilo idealni kruti elastični element. Dok dinamometar i pojačalo generiraju grešku ovisno o procesu, AD konverter sa svojom brzinom pretvorbe utječe na grešku isključivo u ovisnosti o vremenu uzorkovanja [3].

3.1. Etalonski dinamometri

Dinamometri se općenito prema namjeni dijele na:

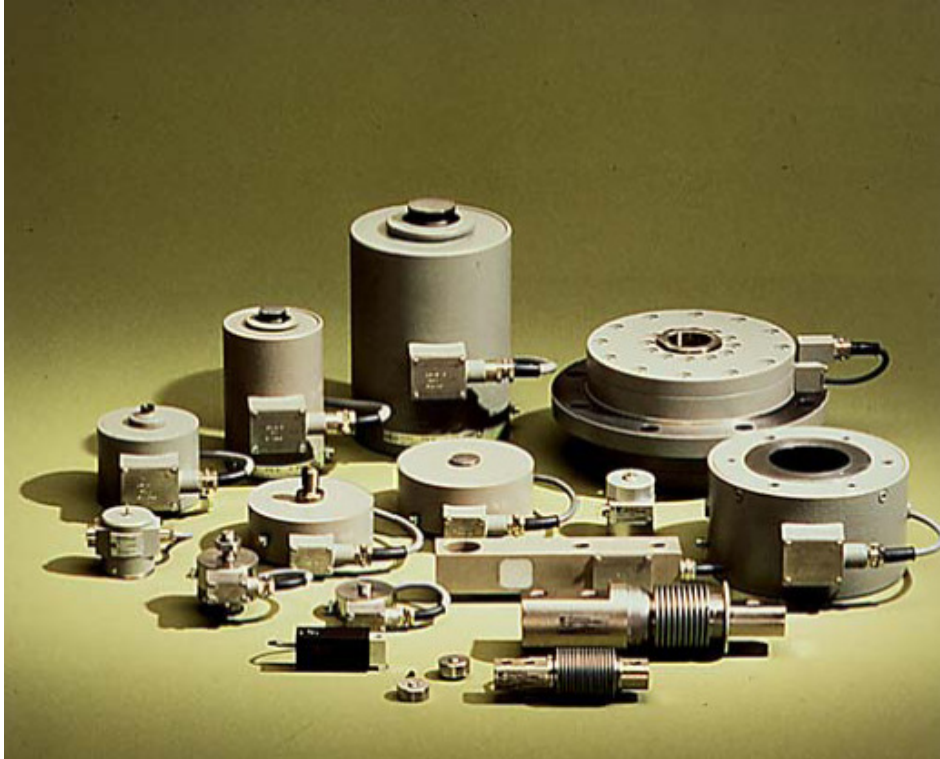
- dinamometre za industrijska mjerenja sile
- dinamometre za laboratorijska precizna mjerenja

Na slici 13 dan je presjek jednog tlačnog i jednog vlačnog dinamometra.



Slika 13. Presjek dinamometra tlačnog (ljevo) i vlačnog (desno) [6]

Glavni dio dinamometra je središnji elastični dio na kojem su naljepljene mjerne trake. Čvrsto kućište štiti "elastični element" od bočnih sila i potpuno izolira od utjecaja okoline. Dimenzije i oblik elastičnog dijela osiguravaju jedinstvenu raspodjelu naprezanja u zoni mjernih traka. Mjerne trake su osjetnici koji šalju mjerni signal pojačalu. Na slici 14 prikazan je niz različitih dinamometara koji spadaju u skupinu mjernih pretvornika jer pretvaraju neku mehaničku veličinu (sila, moment i dr.) u električnu. [6]

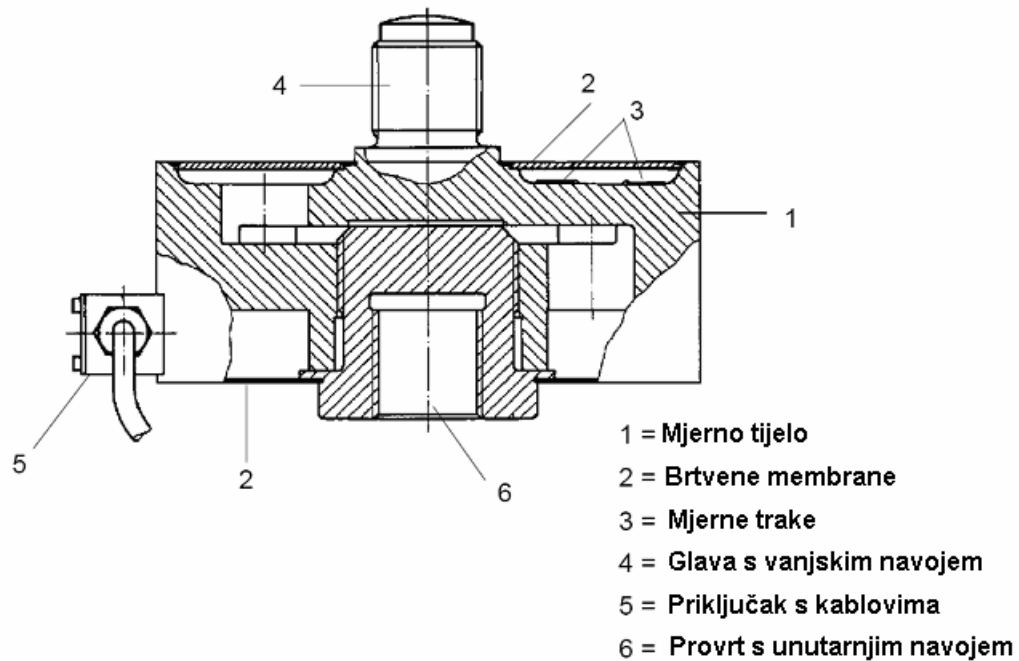


Slika 14. Primjeri nekih dinamometara [3]

Stoga ovi dinamometri ne služe samo za mjerenje sile, već postoje i oni za mjerenje torzionog ili savojnog momenta, mase i tlaka.

3.1.1. Opis etalonskog dinamometra Z4

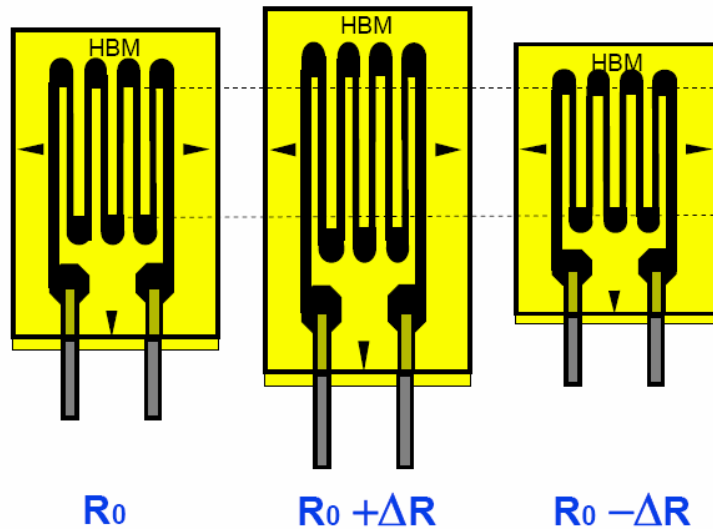
Etalonski dinamometar Z4 nazivne sile 500 kN korišten u ovom radu, proizvod je tvrtke Hottinger Baldwin Messtechnik, Njemačka. Na slici 15 prikazan je presjek ovog dinamometra i označeni su njegovi glavni dijelovi. Mjerno tijelo sadržava sistem s osam mjernih traka od kojih su četiri poprečno postavljene, a četiri uzdužno. [13] Za potrebe vlačnog opterećivanja, na vrhu uređaja se nalazi glava s vanjskim navojem, a s donje strane je provrt s unutarnjim navojem. Kućište dinamometra je hermetički zatvoreno i s gornje i s donje strane brtvenim membranama, tako da vlaga ne može naškoditi osjetljivim dijelovima.



Slika 15. Presjek kućišta dinamometra [13]

3.1.2. Mjerne trake

Mjerne trake definiranog otpora čvrsto su naljepljene na elastični dio dinamometra i pod djelovanjem opterećenja deformiraju se zajedno s dinamometrom čime dolazi do promjene njihova otpora, slika 16. Postoje razne vrste mjernih traka, a u dinamometru Z4 su korištene linearne mjerne trake s metalnom folijom serije K. [6] One se spajaju u mjerni most poznat kao *Wheatstone-ov most* na način kako je prikazano na slici 17.



Slika 16. Utjecaj deformacije trake na promjenu otpora [8]

Ako se na Wheatstone-ov most narine neki ulazni napon zbog deformacije mjernih traka i promjene njihova otpora mijenja se vrijednost izlaznog napona te ova promjena napona predstavlja izlazni signal koji se dodatno pojačava uz pomoć mjernog pojačala.

Za spajanje traka u Wheatstone-ov most koriste se aktivne mjerne trake naljepljene na predmet ispitivanja ili dinamometar, kompenzirajuće trake (pasivni elementi) i metalni (folijski) otpornici koji su velike točnosti i stabilnosti. Ovisno o broju aktivnih mjernih traka u Wheatstone-ovom mostu razlikujemo sljedeće kombinacije: 1/4-ski, 2/4 -ski i puni most s 4 aktivne trake. [8]

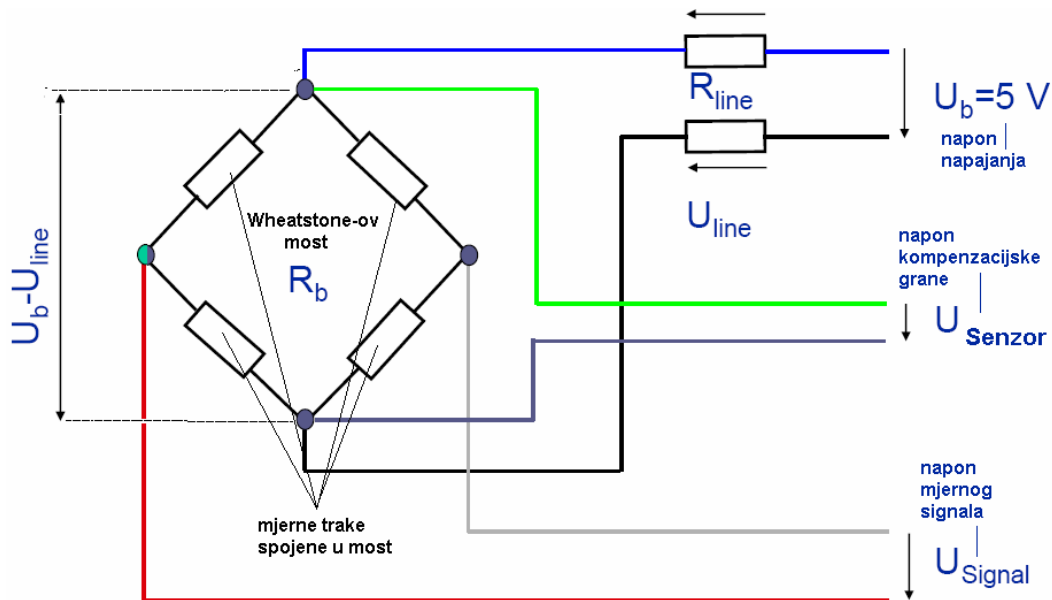
Ovisnost između deformacije i promjene otpora mjerne trake je linearna i može se predložiti sljedećim izrazom:

$$\varepsilon \cdot k = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (9)$$

gdje je k konstanta ovisna o materijalu mjerne trake i definira njenu osjetljivost, R_0 je električni otpor nedeformirane trake, a ΔR promjena električnog otpora.

Za puni Wheatstone-ov most omjer izlaznog i ulaznog napona određen je izrazom:

$$\frac{U_{\text{Signal}}}{U_b} = \frac{k}{4} \cdot 2.6 \cdot \varepsilon \quad (10)$$



Slika 17. Puni Wheatstone-ov most s 4 mjerne trake [8]

3.1.3. Konektori (električne instalacije)

Kabeli dinamometra posebno su zaštićeni i niskog kapaciteta. Mjerni kabeli nesmiju se nalaziti blizu visoko naponskih kablova radi utjecaja električnog polja. Uzemljenje mora biti riješeno posebno za dinamometar, pojačalo i displej. Oko mjernog sustava postoji Faraday-ev kavez, jer je zaštita kabela spojena po "Greenline konceptu". Elektromagnetska interferencija ne utječe na mjerni sustav. Na slici 18 prikazano je značenje pojedinih izvoda. [13]



Slika 18. Konektori i spojna shema [13]

Kabel dinamometra može biti 4-žilni ili 6-žilni s time da se danas preferiraju 6-žilni kabeli zbog anuliranja duljine vodiča. Kabeli mogu biti dugi i po 500 m, te je stoga važno kompenzirati pad napona u vodičima. Bilo kakva produženja kabela se moraju samo uvijek izvoditi samo sa šestožilnim spojem.

3.2. MJERNA POJAČALA

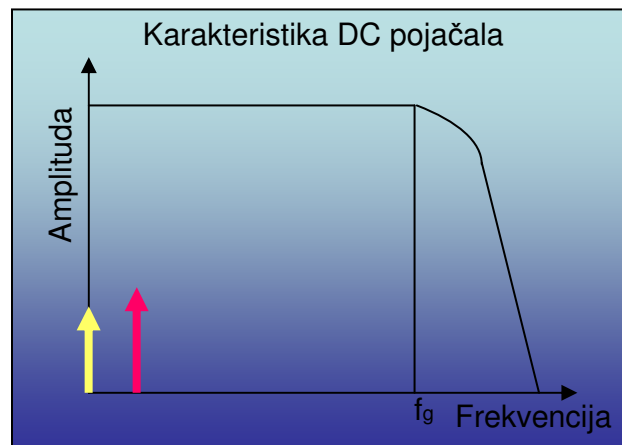
Mjerno pojačalo je jedan od glavnih elemenata mjernog sustava. Služi za pojačanje izlaznog signala s dinamometra budući da se radi o vrlo malim promjenama napona maksimalnog iznosa do 10 mV uz napon napajanja Wheatstone-ovog mosta od 5 V. Da bi se tako male promjene napona mogle odrediti i očitati sa zadovoljavajućom točnošću, one se moraju dodatno pojačati na mjernom pojačalu. Osnovni zahtjevi, koji se postavljaju pred mjerna pojačala su: osiguravanje napona (struje) na izlazu koji su proporcionalni veličinama napona (struje) na ulazu pojačala, što manja vlastita potrošnja, što vjernije praćenje promjene mjerene veličine (prenošenje signala bez dodatnih šumova). Pored toga, mjerna pojačala se koriste i za daljnju obradu mjernog signala (sabiranje, oduzimanje, množenje, logaritmiranje, integriranje i slične matematičke operacije). Postupak obrade mjernog signala može se vršiti na dva načina: digitalno ili analogno. Analogna tehnika podrazumijeva korištenje različitih elektronskih krugova (operaciona pojačala) dok digitalna tehnika, koja je točnija podrazumijeva korištenje programskih paketa za obradu mjernih podataka.



Slika 19. Različite vrste pojačala [13]

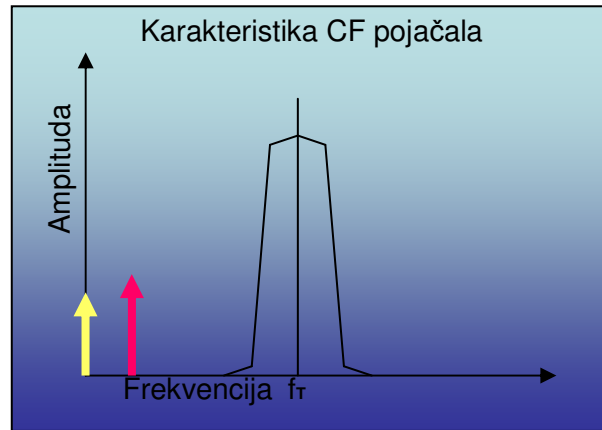
Na slici 19 prikazani su neki tipovi pojačala, a dio su palete HBM-ovih proizvoda. To mogu biti industrijska pojačala kompaktnog dizajna, zadovoljavajuće ponovljivosti i točnosti, jednostavna za rukovanje ili mjerna pojačala koja prije svega moraju biti visoke točnosti. Mogu se podijeliti na dva tipa pojačala: DC (istosmjerna pojačala) i CF (pojačala s nosećom frekvencijom).

Na slikama 20 i 21 prikazane su karakteristike ovih pojačala. Kod DC pojačala (slika 20) postoji prekidna frekvencija f_g iznad koje ne dolazi do pojačanja signala te se iznad te frekvencije amplituda naglo smanjuje. Međutim nepoželjna strana ovih pojačala je što pojačavaju šumove, smetnje koje se javljaju prilikom mjerenja što se odražava i na točnost mjerenja. [3]



Slika 20. Karakteristika DC pojačala

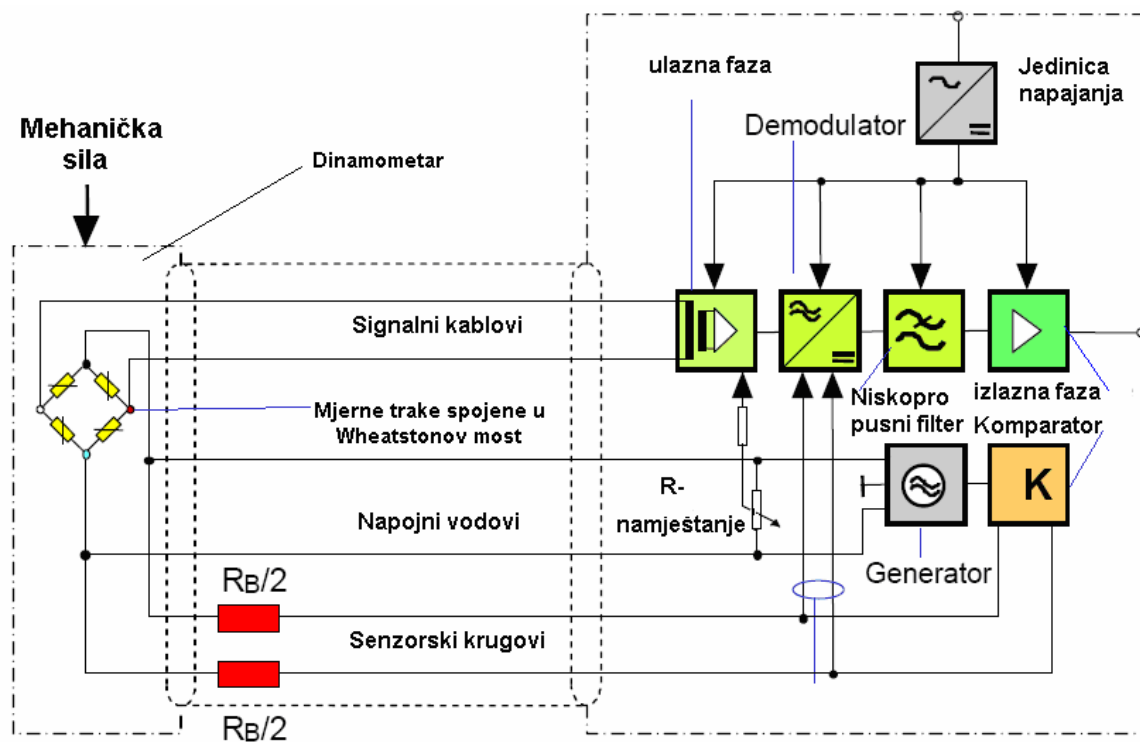
Kod CF pojačala (slika 21) smanjuje se značajno utjecaj šumova i smetnji jer ona pojačavaju samo one signale čija je frekvencija blizu noseće f_T , pa su time CF pojačala puno točnija. Osim toga puno je stabilnija frekvencija nego kod DC pojačala s obzirom na signal nule i na promjenu signala usljed utjecaja temperature.



Slika 21. Karakteristika CF pojačala

Frekvencijska područja za CF pojačala su niža nego ona kod DC pojačala.

Na slici 22 prikazana je shema jednog CF pojačala s nosećom frekvencijom.



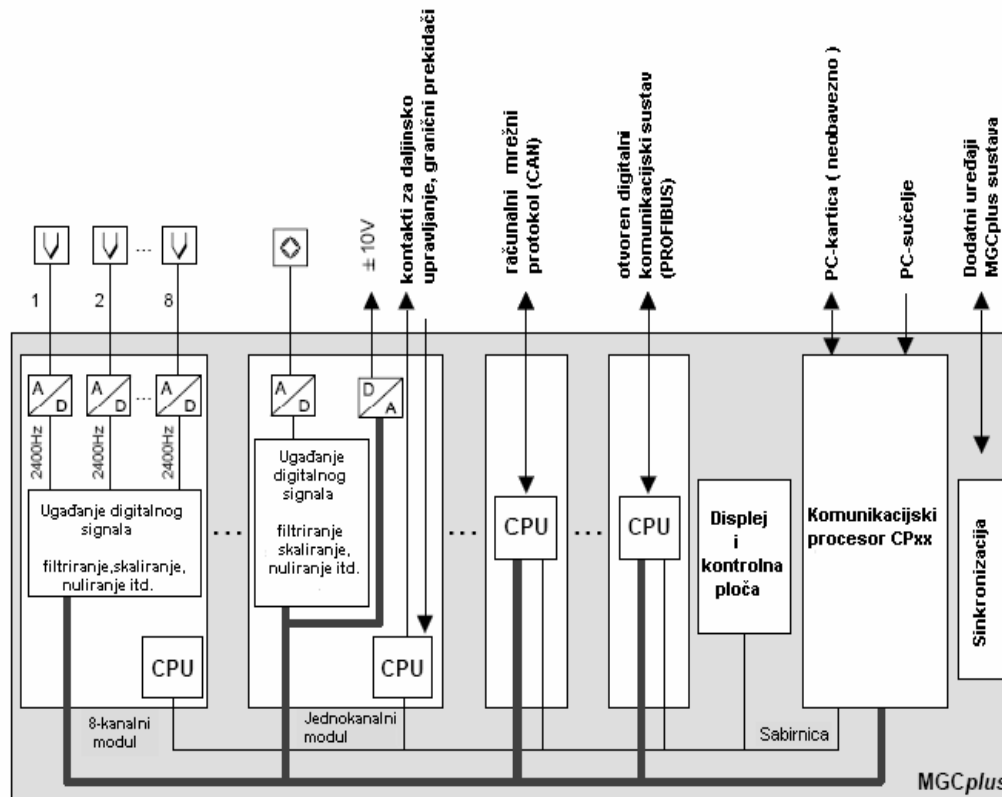
Slika 22. Blok dijagram CF pojačala [3]

S lijeve strane prikazan je dinamometar s četiri mjerne trake na koji djeluje neko mehaničko opterećenje. Naponski signal koji nastaje kao rezultat djelovanja opterećenja u pojačalu se demodulira, filtrira i potom pojačava.

U nastavku je detaljnije opisano mjerno pojačalo MGCplus koje se koristi u eksperimentalnom dijelu rada.

3.2.1. MGCplus pojačalo

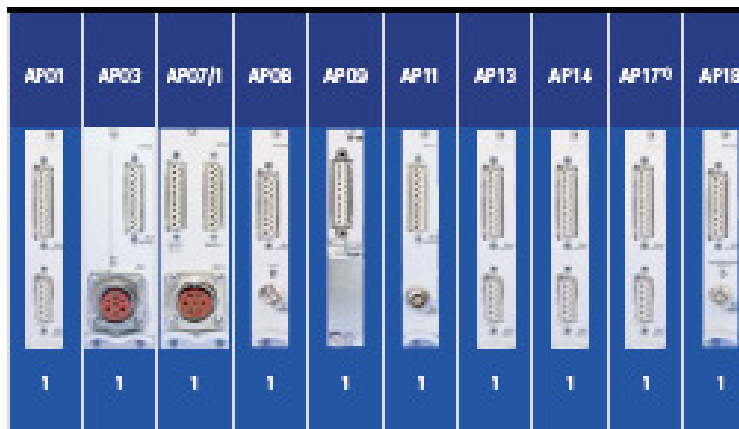
MGCplus pojačalo ima modularnu građu, te je moguće mjeriti i do 128 mjernih točaka u slučaju višekanalnog pojačala. MGCplus može sadržati različite module i svaki radi zasebno uz unutarnju centralnu procesnu jedinicu (CPU) [13].



Slika 23. Blok dijagram MGCplus sistema (HBM) [13]

Na slici 23 prikazana je općenita shema MGCPlus sustava. Sastoji se od ugrađenih modula, displeja s kontrolnom pločom, komunikacijskog procesora, sinkronizacijske ploče, posebnih ploča sa svojim CPU-om za mrežne i komunikacijske protokole (CAN i Profibus). Sve je povezano sa sabirnicom, osim ploče za sinkronizaciju. Sa protokolima se ostvaruje dvosmjerna komunikacija kao i kod ploče za sinkronizaciju. Unutar pojedinog modula postoji zasebni CPU i A/D konverter (i D/A kod jednokanalnog modula). U tim modulima se odvija ugađanje digitalnog signala, filtriranje, skaliranje, nuliranje, itd. Na taj način podaci kao što su nazivna vrijednost dinamometra, frekvencija filtra i mjerno područje obrađuju se u digitalnom obliku. Digitalno prilagođen signal pohranjuje se u internu sabirnicu visoke brzine. Unutarnje procesor (PC) je veličine kreditne kartice i skuplja podatke sa ukupnom učestalošću uzorkovanja od 262.144 vrijednosti po sekundi. [8, 13]

Na slici 24 prikazani su različiti moduli za spajanje (jednokanalna pojačala).

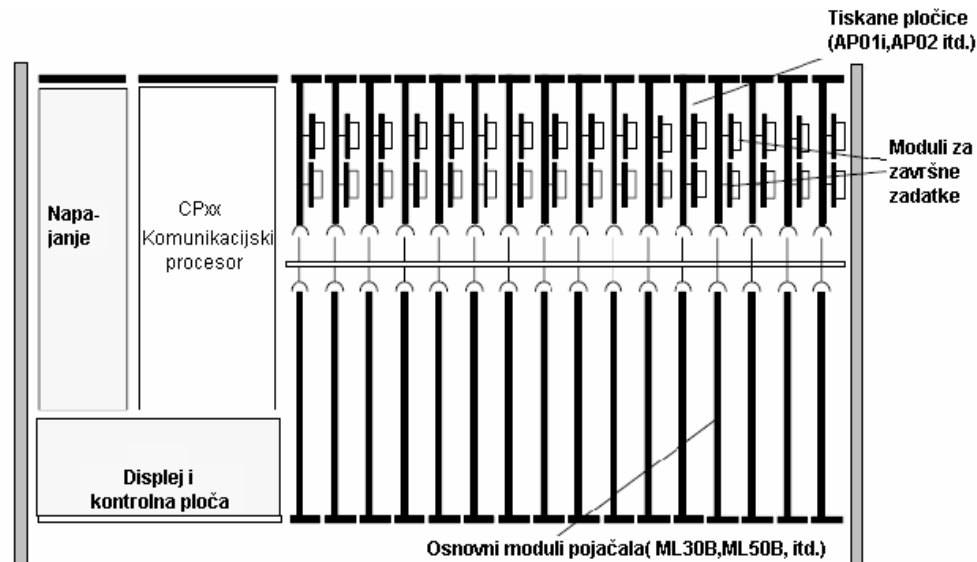


Slika 24. Prikaz modula za spajanje kod jednokanalnog pojačala [13]

Kod višekanalnih modula svi mjerni signali mogu biti snimljeni istovremeno s obzirom da svaki kanal ima vlastiti A/D konverter. U MGCplus-u nema sklopova "uzorkovati i zapamtiti" ("sample&hold") ili multipleksera ("multiplexer"). Ovo osigurava kontinuirano digitalno filtriranje i najstabilniji mogući signal. [8, 13]

Koristeći vezne sklopove kao što su Ethernet ili USB, podaci se šalju na eksterno računalo ili PLC gdje se dodatno obrađuju .


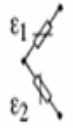

Svi jednokanalni moduli imaju niskopropusni filter i automatsko tariranje.



Slika 25. Prikaz razmještaja elemenata MGCplus-a [13]

Na slici 25 prikazan je razmještaj elemenata unutar kućišta MGCplus-a. S lijeve strane su smješteni nepomični moduli, napajanje, procesor, displej sa kontrolnom pločom, a s desne strane je prostor predviđen za module koji su lako izmjenjivi, sa mnoštvom konektora spojenih preko svojevrzne sabirnice. Svaki od tih modula obavlja posebne zadatke, kao što su npr. moduli pomoću kojih se ostvaruje veza s dinamometrom, zatim moduli za završne zadatke odnosno sama kartica pojačala koje određuju točnost MGCplus-a. [8, 13]

Tablica 1. Kombinacije mjernih traka i pripadajući moduli

| Tip mosta | Broj aktivnih mj. traka | ukupna deformacija | tiskana pločica | Moduli (serija) pojačala |
|--|-------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Četvrtina mosta  | 1 | ϵ | AP14 | ML10B, ML30B, ML55B |
| Polovina mosta  | 2 | $\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$ | AP01i, AP03i, AP11i, AP13i, AP14 | ML10B, ML55B ML30B (with AP14 only) |
| Cijeli most  | 4 | $\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4$ | AP01i, AP03i, AP11i, AP13i, AP14 | ML10B, ML30B, ML55B, ML38B ¹⁾ |

U tablici1 su prikazane različite mogućnosti Wheatstone-ovog mosta te tiskane pločice i moduli pojačala koji podržavaju određeni tip mosta. [13]

U tablici 2 navedene su karakteristike modula za pojačanje ML38 koji se nalazi u pojačalu MGCPplus korištenom u eksperimentalnom dijelu rada. [13]

Tablica 2. Karakteristike modula ML38

| | | | | | | | | | |
|---|----------|---|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Klasa točnosti | | 0.0025 | | | | | | | |
| Točnost | % | $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ (0.0025 mjerne vrijednosti+ 0.0025 vrijednosti pune skale) | | | | | | | |
| Noseća frekvencija | Hz | 225.05 $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ 0.02 | | | | | | | |
| Napon napajanja ($\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ 5%) | V | 5 | | | | 2.5 | | | |
| Puni most 4 mjerne trake | Ω | 30...4000; tipično 350 | | | | | | | |
| Dopuštena duljina kabela između dinamometra i pojačala | m | 500 max. | | | | | | | |
| CF pojačalo | | | | | | | | | |
| Mjerna područja Područje mosnog namještanja | mV/V | $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ 0.2 ... 5.1 (U _B = 5V) $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ 0.4 ... 10.2 (U _B = 2.5V) | | | | | | | |
| | mV/V | $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ 5.1 (U _B = 5V) $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix}$ 10.2 (U _B = 2.5V) | | | | | | | |
| <i>Frekvencijsko mjerno područje</i> Butterworth niskopropusni | | <i>Nivoi filtera</i> | | | | | | | |
| Nazivna (maksimalna) vrijednost | Hz | f1 1.0 | f2 1.5 | f3 2.5 | f4 3 | f5 5 | f6 6 | f7 9 | f8 10 |
| f (−3dB) | Hz | 1.1 | 1.6 | 2.3 | 3.2 | 4.6 | 6.3 | 8.3 | 10 |
| f (prigušenje=1000) | Hz | 18.9 | 21.6 | 24.5 | 27.4 | 30.5 | 33.8 | 37.3 | 41 |
| f (prigušenje =1000000) | Hz | 50 | 54 | 57 | 61 | 65 | 68 | 70 | 72 |
| Vrijeme smirivanja do 99% | s | 1 | 0.7 | 0.5 | 0.37 | 0.26 | 0.2 | 0.16 | 0.13 |
| Vrijeme smirivanja do 99.999% | s | 2.3 | 1.6 | 1.14 | 0.82 | 0.58 | 0.42 | 0.30 | 0.23 |
| Bessel niskopropusni | | <i>Nivoi filtera</i> | | | | | | | |
| Nazivna (maksimalna) vrijednost | Hz | f1 0.03 | f2 0.05 | f3 0.1 | f4 0.2 | f5 0.5 | f6 0.9 | F7 1.5 | |
| f (−3dB) | Hz | 0.03 | 0.05 | 0.1 | 0.22 | 0.45 | 0.9 | 1.7 | |
| f (prigušenje =1000) | Hz | 0.125 | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 8 | |
| f (prigušenje =1000000) | Hz | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.7 | 3.5 | 7 | 14 | |
| Vrijeme smirivanja do 99% | s | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | |
| Vrijeme smirivanja do 99.999% | s | 48 | 24 | 12 | 6 | 3 | 1.5 | 0.75 | |
| Rezolucija displeja | brojka | 1000000 | | | | | | | |
| Adaptacija dinamometra | | linearna ili polinomna karakteristika *) | | | | | | | |

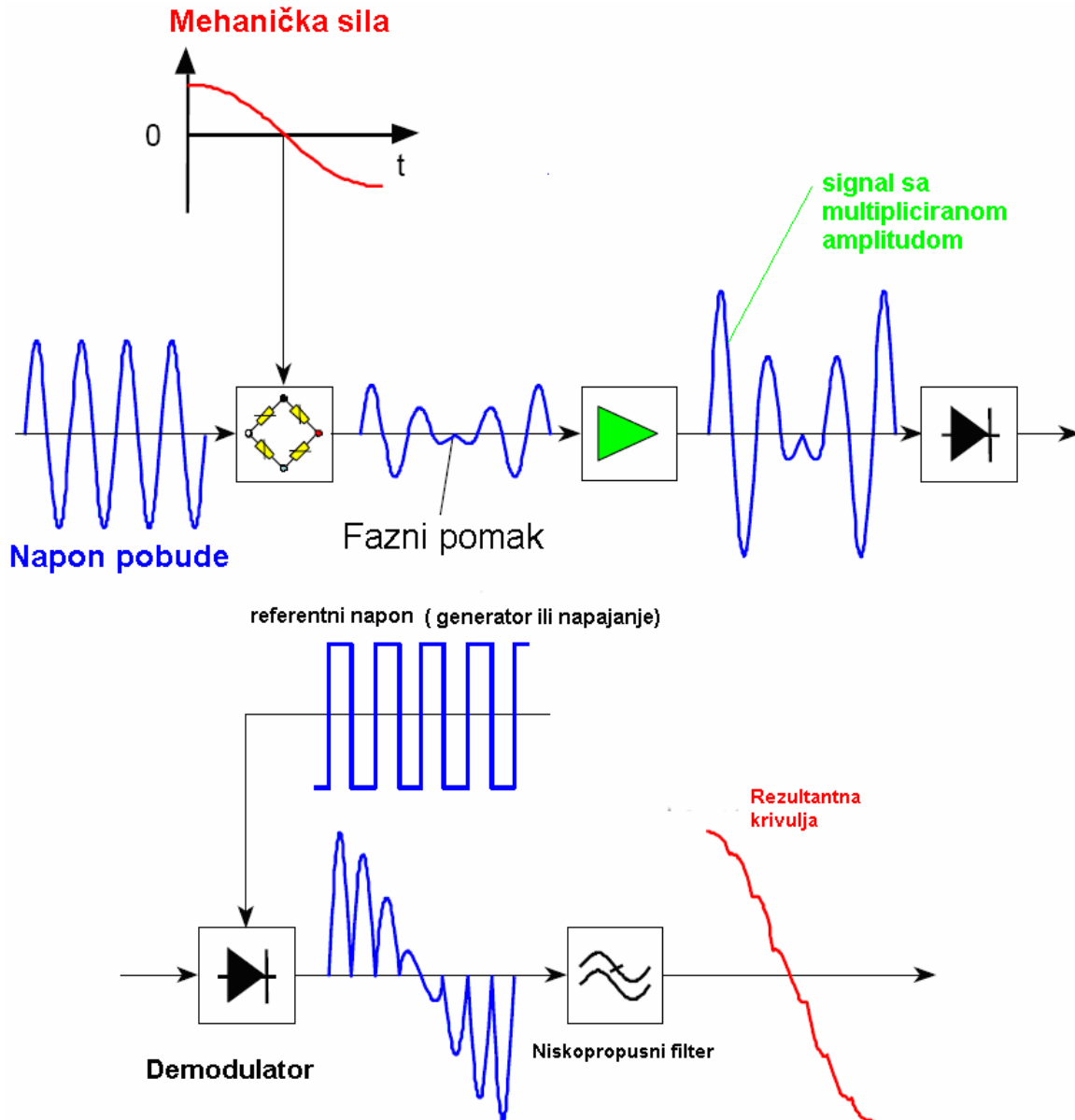
*) Kod namještanja mjernog lanca, mjerne vrijednosti moraju se usvojiti u električnim jedinicama mV/V bez adaptacije pokazivača

Radi se o pojačalu klase točnosti 0.0025, noseće frekvencije 225 Hz na koji se priključuje puni most s 4 mjerne trake. Ovo pojačalo raspolaže s 2 vrste niskopropusnih filtera: Butterworth i Bessel.

3.3. Mjerenje sile pomoću etalonskog dinamometra i mjernog pojačala

3.3.1. Princip rada sustava

Proces mjerenja shematski je prikazan na slici 26. Djelovanjem neke mehaničke sile na dinamometar zbog nastupajuće deformacije mjernih traka odnosno promjene njihova otpora mijenja se izlazni napon s Wheatstone-ova mosta s obzirom na ulazni napon napajanja. Usljed promjene amplitude i faznog pomaka javlja se izobličen izlazni signal. Taj signal je jako slab i da bi ga uopće mogli registrirati i dalje operirati s tim signalom potrebno je isti pojačati. Stoga ovaj signal ulazi u pojačalo u kojem prvo dolazi do multipliciranja amplitude, što je primarna zadaća pojačala. Ovako pojačani signal ide dalje u demodulator. Paralelno sa signalom u demodulator dolazi i referentni signal pravokutnog oblika te dolazi do njihova superponiranja i noseći signal se mijenja pod utjecajem tzv. obavjesnog signala. [3]



Slika 26. Promjena signala u mjernom sustavu [3]

Noseća frekvencija f_T je frekvencija referentnog napona. Brzina uzorkovanja je brzina pri kojoj se uzorkuje obavjesni signal uzorkovan tijekom modulacije. Frekvencija nosećeg signala je obično mnogo veća od najveće frekvencije ulaznog obavjesnog signala. Nyquistov teorem uzorkovanja zahtjeva da brzina uzorkovanja bude veća od dvostrukog zbroja noseće frekvencije i najveće

frekvencije moduliranog signala da bi demodulator informaciju povratio točno bez gubitaka. [15]

Ovisno što je preneseno nosećim valom amplituda, frekvencija ili fazni pomak, ta informacija će se uzimati kao osnova za formiranje novog signala. U slučaju MGCplus pojačala riječ je o faznom pomaku i frekvenciji. Naposljetku signal ide u niskopropusni filter što je malo opširnije opisano u točki 3.3.2. Filtrirani signal sadrži vršne vrijednosti prijašnjeg signala čime nastaje rezultatni izlazni signal koji daje informaciju o mjernoj vrijednosti, što se očitava na displeju ili šalje dalje na računalo kako bi se podaci dodatno obradili pomoću različitih programskih paketa.

U slučaju mjernog sustava korištenog u ovom radu za obradu podataka koristi se programski paket Catman.

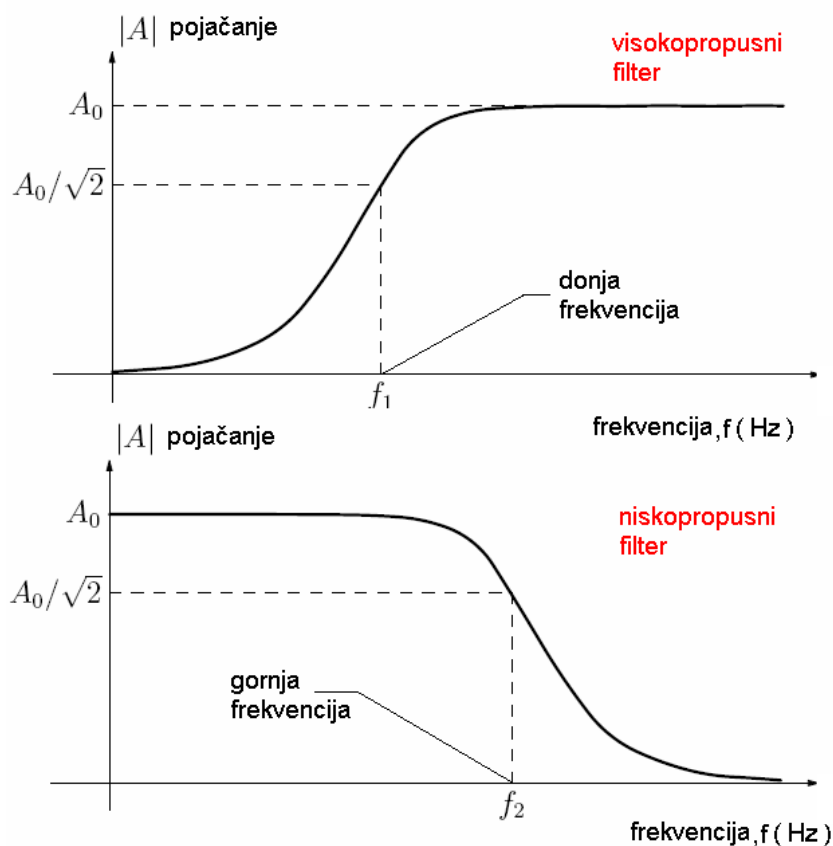
3.3.2. Filtriranje signala

U elektroničkim uređajima potrebno je eliminirati različite oscilacije i pobude koje predstavljaju smetnje. To su tzv. šumovi. Premda se dio takvih smetnji otklanja dobrim uzemljenjem i efektom Faraday-evog kaveza, ostaju frekvencije koje se na taj način ne mogu otkloniti, a s druge strane javlja se i potreba da se kontrolira točno područje frekvencija koje nisu poželjne. Sklopovi kojima se kontrolira određeno frekvencijsko područje nazivaju se filteri. [15]

Filtriranje signala vrši se radi eliminiranja određenih frekvencijskih područja u signalu (niskofrekventnih, visokofrekventnih ili pojasa srednje frekvencije). Ovisno o njihovoj frekventnoj karakteristici filteri se dijele na: niskopropusne, visokopropusne, pojasno-propusne i pojasno-nepropusne i uskopojasne (rezonantne). Filtriranje signala sastoji se u nepropuštanju ili propuštanju signala niskih, srednjih ili visokih frekvencija i to iz određenog spektra frekvencija ulaznog signala. Pojas frekvencija koji se propušta naziva se propusna zona, a pojas koji

se ne propušta jest nepropusna zona. Ovdje je riječ o pasivnim filterima i njihovom integralnom ili derivacijskom djelovanju. [16]

Na slici 27 dana je usporedba karakteristika visokopropusnog i niskopropusnog filtera. Visokopropusni filter propušta signale većih frekvencija (frekvencije veće od donje granične frekvencije). Za razliku od visokopropusnog, niskopropusni filter propušta samo signale nižih frekvencija, frekvencija manjih od gornje granične frekvencije. Signale viših frekvencija ovaj filter prigušuje.



Slika 27. Usporedba karakteristika visokopropusnog i niskopropusnog filtera [16]

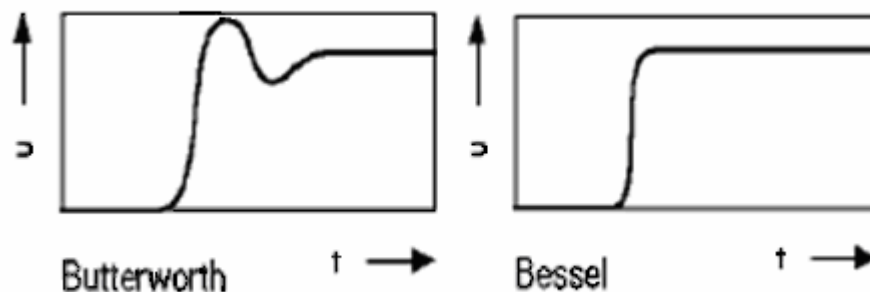
Kod visokopropusnog filtera vidljivo je iz grafa njegovo derivacijsko djelovanje koje proizlazi iz odgovarajuće kombinacije otpornika i kondenzatora. Dakle oni manifestiraju potpuno inverznu karakteristiku u odnosu na niskopropusne filtere.

3.3.2.1. Visokopropusni filteri

Visokopropusni filteri se koriste, da bi se suzbile neželjene interferencije niskih frekvencija ispod definirane prekidne frekvencije. Visokopropusnim filterom mogu se suzbiti spore fluktuacije kao što su one nastale utjecajem temperature. Visokopropusni filteri nemaju svrhu kad su spojeni na otporničke termometre i termoelemente.

3.3.2.2. Niskopropusni filteri

Niskopropusni filteri se koriste da bi se suzbile neželjene interferencije visokih frekvencija iznad definirane prekidne frekvencije. Odziv amplitude, kašnjenje faze i impulsni odziv su ovisni o karakteristikama filtera. Interesantne su 2 vrste niskopropusnih filtera: Butterworth i Bessel (slike 28 i 29). Butterworth-ova karakteristika pokazuje linearni odziv amplitude koji onda padne strmo iznad prekidne frekvencije. Nadvišenje je oko 10%. Bessel-ova karakteristika prikazuje impulsni odziv sa jako malim ili nikakvim nadvišenjem. Amplitudni odziv pada puno blaže. Butterworth-ova karakteristika je u uporabi kad je potrebno jako suzbijanje amplitude, malo iznad prekidne frekvencije f_g . Inače se koristi Bessel-ova karakteristika. [13]



Slika 28. Karakteristika Butterworth filtera

Slika 29. Karakteristika Bessel filtera

4. Umjeravanje po normi DIN EN ISO 7500-1

4.1. Općenito o normi DIN EN ISO 7500-1

Umjeravanje kidalice provodi se prema normi DIN EN ISO 7500-1: "Metalni materijali- Ispitivanje statičkih jednoosnih kidalica- Dio 1: Vlačno / tlačne kidalice - Ispitivanje i umjeravanje mjernog sustava sile".

Norma propisuje da se kidalice umjeravaju korištenjem dinamometra jednakog ili boljeg razreda točnosti od same kidalice ili korištenjem etalonskih utega, ako je riječ o manjim silama. Dinamometri korišteni pri umjeravanju moraju udovoljavati zahtjevima norme EN ISO 376 [5].

4.2. Opis postupka umjeravanja

Ispitivanje kidalice sastoji se od :

- ✱ općeg pregleda kidalice uključujući i pomoćni pribor,
- ✱ umjeravanja mjernog sustava sile.

Oznake značajne u postupku umjeravanja kidalice prikazane su u tablici 3. [5]

Tablica 3. Veličine pri umjeravanju kidalice

| Simbol | Jedinica | Značenje veličine |
|--|----------|--|
| a | % | Relativna rezolucija pokazivača sile kidalice |
| b | % | Relativna greška ponovljivosti sustava za mjerenje sile |
| f_0 | % | Relativna greška nule sustava za mjerenje sile |
| F | N | Stvarna sila očitana na etalonu za rastući niz ispitnih sila |
| F'' | N | Stvarna sila očitana na etalonu za opadajući niz ispitnih sila |
| F_C | N | Stvarna sila očitana na etalonu za dopunski niz rastućih sila u najmanjem mjernom području |
| F_i | N | Sila očitana na pokazivaču sile kidalice za rastući ispitni niz |
| F_i'' | N | Sila očitana na pokazivaču sile kidalice za opadajući ispitni niz |
| \bar{F}_i, \bar{F} | N | Aritmetičke srednje vrijednosti nekoliko mjerenja sile F_i i F na istoj mjernoj točki |
| F_{imax}, F_{imin} F_{max}, F_{min} | N | Maksimalna i minimalna vrijednost sile F_i i F na istoj mjernoj točki |
| F_{iC} | N | Sila očitana na pokazivaču sile kidalice u rastućem dopunskom nizu mjerenja u najmanjem mjernom području |
| F_{i0} | N | Ostatak sile očitana na pokazivaču sile kidalice nakon uklanjanja opterećenja |
| F_N | N | Nazivna vrijednost mjernog područja kidalice |
| q | % | Relativna greška točnosti sustava za mjerenje sile |
| r | N | Rezolucija pokazivača sile kidalice |
| v | % | Relativna greška reverzibilnosti (histereze) sustava za mjerenje sile |

Prvi korak umjeravanja odnosi se na opći pregled kidalice. Prvo se obavlja vizualni pregled kojim se provjerava da nema izraženog trošenja ili oštećenja na vodilicama traverze ili čeljusti, da kidalica nije izložena štetnom djelovanju okoline

(prašina, vibracije, lokalne promjene temperature, elektromagnetsko zračenje, korozija), te da se mase utega mogu korektno identificirati, ako se radi o kidalici s klatnom i utezima. [5] Nakon toga se provodi pregled strukture kidalice kojom se utvrđuje da li struktura i čeljusti omogućuju aksijalnu primjenu sile. Zadnji korak predstavlja pregled mehanizma za pogon traverze. Pogonski mehanizam traverze treba omogućiti jednoliku i postepenu promjenu sile te postizanje različitih vrijednosti diskretnih sila za zadovoljavajućom točnošću.

Nadalje potrebno je odrediti rezoluciju pokazivača sile koji može biti digitalan ili analogan. Kod digitalnog pokazivača rezolucija (r) je jednaka minimalnom pomaku na brojaču numeričkog pokazivača kada je kidalica neopterećena, a motor i upravljački sustav rade. Preko rezolucije " r " određuje se vrijednost relativne rezolucije pokazivača sile (a) i to za svaku mjernu točku umjeravanja :

$$a = \frac{r}{F_i} \cdot 100, \% \quad (11)$$

Relativna rezolucija nesmiye prijeći vrijednosti navedene u tablici 4 za razmatrani razred točnosti kidalice. [4, 5]

Tablica 4. Karakteristične vrijednosti sustava za mjerenje sile

| Razred točnosti mjernog područja | Maksimalna dopuštena vrijednost, % | | | | |
|--|------------------------------------|----------------------|------------------|---------------|--------------------------------|
| | Relativne greške | | | | Relativna rezolucija a |
| | točnosti q | ponovljivosti b | histereze v | nule f_0 | |
| 0,5 | $\pm 0,5$ | 0,5 | $\pm 0,75$ | $\pm 0,05$ | 0,25 |
| 1 | $\pm 1,0$ | 1,0 | $\pm 1,5$ | $\pm 0,1$ | 0,5 |
| 2 | $\pm 2,0$ | 2,0 | $\pm 3,0$ | $\pm 0,2$ | 1,0 |
| 3 | $\pm 3,0$ | 3,0 | $\pm 4,5$ | $\pm 0,3$ | 1,5 |

U tablici 4 također su prikazane dozvoljene vrijednosti relativnih grešaka mjernog sustava kitalice. Smatra se da je mjerno područje ispravno ukoliko su dobiveni zadovoljavajući rezultati unutar područja od najmanje 20% pa do 100% nazivne vrijednosti.

Induciranoj sili očitanoj na kitalici (F_i) odgovara referentna vrijednost promjene napona (X_{REF}), a stvarnoj sili (F) očitanoj na etalonu odgovara izmjerena vrijednost promjene napona (X). Za svaku mjernu točku računa se aritmetička sredina vrijednosti izmjerenih u pojedinim nizovima mjerenja pri istoj diskretnoj sili i označava se X_{sr} . Aritmetička sredina je potrebna za računanje relativnih grešaka točnosti (q) i ponovljivosti (b). Relativna greška točnosti određuje se pomoću jednadžbe :

$$q = \frac{X_{REF} - X_{sr}}{X_{sr}} \cdot 100, \% \quad (12)$$

a relativna greška ponovljivosti slijedi iz izraza:

$$b = \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{sr}} \cdot 100, \% \quad (13)$$

gdje su X_{max} i X_{min} najveća i najmanja vrijednost izmjerene pri istoj diskretnoj sili.

Rrelativna greška histereze, reverzibilnosti (ν) dana izrazom:

$$\nu = \frac{X_{REF} - X_{2''}}{X_{sr}} \cdot 100, \% \quad (14)$$

Gdje je $X_{2''}$ vrijednost izlaznog signala očitana u silaznom nizu za određenu diskretnu silu. [4, 5]

Relativne greške q , b i ν računaju se za svaku mjernu točku i trebaju zadovoljavati vrijednosti navedene u tablici 4.

Relativna greška nule (f_0) računa se za svaki niz mjerenja kao omjer sile koja preostaje na kidalici nakon rasterećenja i nazivne sile mjernog područja:

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \cdot 100, \% \quad (15)$$

Ove greške i relativna rezolucija su faktori pomoću kojih se vrši klasifikacija ispitivanog uređaja.

Dodatno treba ispitati utjecaj mehaničkog pribora kao što su prateća kazaljka i uređaj za zapisivanje. To je moguće ispitati sljedećim metodama ovisno o tome da li se kidalica normalno koristi sa ili bez pribora. Ako se pribor obično ne koristi, tada je potrebno provesti tri rastuća niza mjerenja u svim mjernim područjima i to bez priključnog pribora te jedan niz mjerenja u najmanjem mjernom području sa priključenim priborom. Ukoliko se kidalica normalno koristi sa priborom tada je potrebno načiniti tri rastuća niza mjerenja u svakom mjernom području s priborom priključenim na kidalicu te jedan dodatni niz mjerenja u najmanjem mjernom području bez priključnog pribora. Greška točnosti se u tom slučaju računa uzevši u obzir tri niza mjerenja, a greška ponovljivosti se računa iz četiri niza. Pri tom moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti :

- za umjeravanje sa konstantnom silom F_i :

$$100 \cdot \left| \frac{F_i - F_C}{F_C} \right| \leq 1,5 \cdot |q| \quad (16)$$

- za umjeravanje sa konstantnom stvarnom silom F :

$$100 \cdot \left| \frac{F_{iC} - F}{F} \right| \leq 1,5 \cdot |q| \quad (17)$$

Kada su za umjeravanje jednog mjernog područja potrebna dva dinamometra tada se ista sila zasebno primjenjuje na oba dinamometra, a razlika relativnih grešaka točnosti ne smije biti veća od 1,5 puta vrijednost greške ponovljivosti:

$$q_1 - q_2 \leq 1,5 \cdot b \quad (18)$$

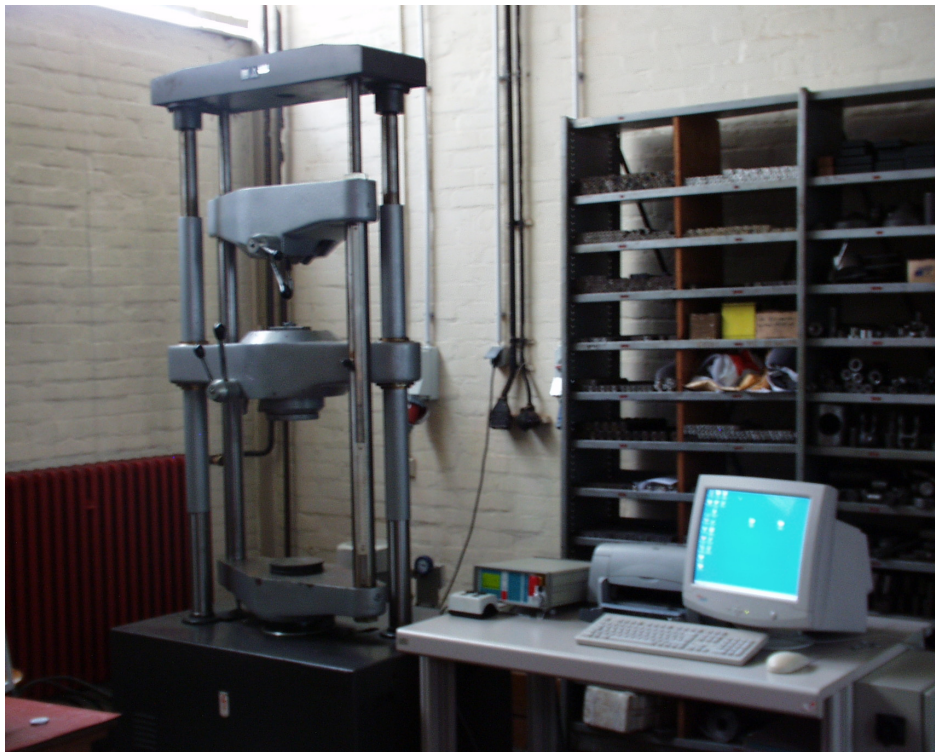
U postupku umjeravanja kidalica se prvo predopterećuje tri puta do vrijednosti nazivne sile, a nakon toga je potrebno načiniti tri rastuća niza mjerenja. Svaki niz mjerenja mora sadržavati bar pet mjernih točaka približno jednoliko raspoređenih u području 20 % do 100 % nazivne vrijednosti. Prije svakog uzlaznog niza dinamometar se rotira za 120° i potom predopterećuje do vrijednosti nazivne sile.

Kod umjeravanja bitno je dinamometar pravilno pozicionirati na kidalici na način da se njegov centar upravo podudara s aksijalnom osi opterećenja kidalice.

[4, 5]

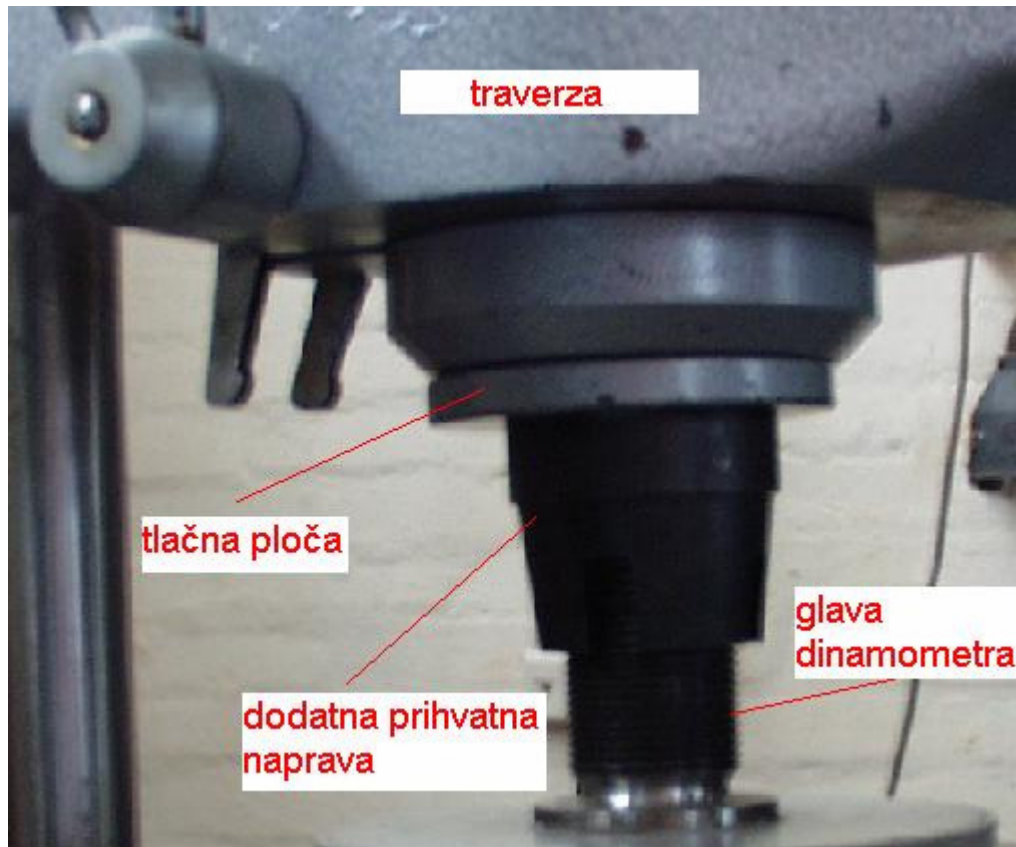
5. Eksperimentalni dio

Na slici 30 prikazana je umjeravana kidalica sa upravljačkom jedinicom spojenom na osobno računalo. Riječ je o modelu EU40mod, njemačkog proizvođača WPM.



Slika 30. Umjeravana kidalica sa upravljačkim uređajem i PC-om

Kidalica je umjeravana tlačnim opterećivanjem pri čemu je korištena zglobna tlačna ploča. Ova se ploča nalazi s donje strane traverze i u postupku umjeravanja nalježe na tlačnu napravu smještenu na glavi dinamometra kako je prikazano na slici 31.



Slika 31. Prikaz tlačnog opterećivanja dinamometra

Kidalica je umjeravana s dinamometrom različito pozicioniranim s obzirom na aksijalnu os opterećenja. Stoga je prvo umjeravanje napravljeno s dinamometrom postavljenim upravo u centru tlačne ploče, a u narednim umjeravanjima dinamometar je izmaknut za udaljenost: 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm i 25 mm.

Nakon temeljitog pregleda kidalice, provedeno je mjerenje temperature (temperatura mora ostati stabilna u granicama ± 2 °C u svakom nizu mjerenja) i mjerenje hrapavosti tlačnih ploča, instrumentom za mjerenje hrapavosti (slika 32) interne oznake LIMS 401/SD.



Slika 32. Instrument za mjerenje hrapavosti

Pri određivanju hrapavosti radi se serija izmjera od 5 vrijednosti za gornju tlačnu ploču, te donju ploču, tablica 5.

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti hrapavosti tlačnih ploča

| Mjerenje | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Srednja vrijednost |
|-----------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| Hrapavost, μm | gornja ploča | 2,7 | 3,5 | 3,8 | 3,0 | 2,9 | 3.18 |
| | donja ploča | 3,6 | 3,9 | 2,8 | 2,5 | 2,0 | 2.96 |

Na temelju provedenih mjerenja izračunate su srednje vrijednosti hrapavosti. Hrapavost gornje tlačne ploče prosječno iznosi $3.18 \mu\text{m}$, a donje ploče $2.96 \mu\text{m}$ što su vrijednosti koje su zadovoljavajuće i u skladu sa normom.

Zatim se mjeri tvrdoća tlačnih ploča, tvrdomjerom interne oznake LIMS 305/MIC 10 DL. Tvrdoća je određena na 5 mjesta na svakoj tlačnoj ploči, tablica 6.

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti tvrdoće tlačnih ploča

| Mjerenje | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Srednja vrijednost |
|-----------------|--------------|------|------|------|------|------|--------------------|
| Tvrdoća, HRC | gornja ploča | 56,2 | 57,5 | 58,0 | 56,2 | 57,7 | 57.1 |
| | donja ploča | 58,6 | 58,1 | 55,9 | 57,0 | 57,3 | 57,4 |

Srednja vrijednost za gornju ploču iznosi 57.1 HRC, a za donju ploču 57.4 HRC. Budući da su izmjerene tvrdoće veće od 55 HRC koliko je propisano normom tlačne ploče kitalice zadovoljavaju i u tom pogledu. Prenosni tvrdomjer za mjerenje tvrdoće metodom po Rockwellu C prikazan je na slici 33.

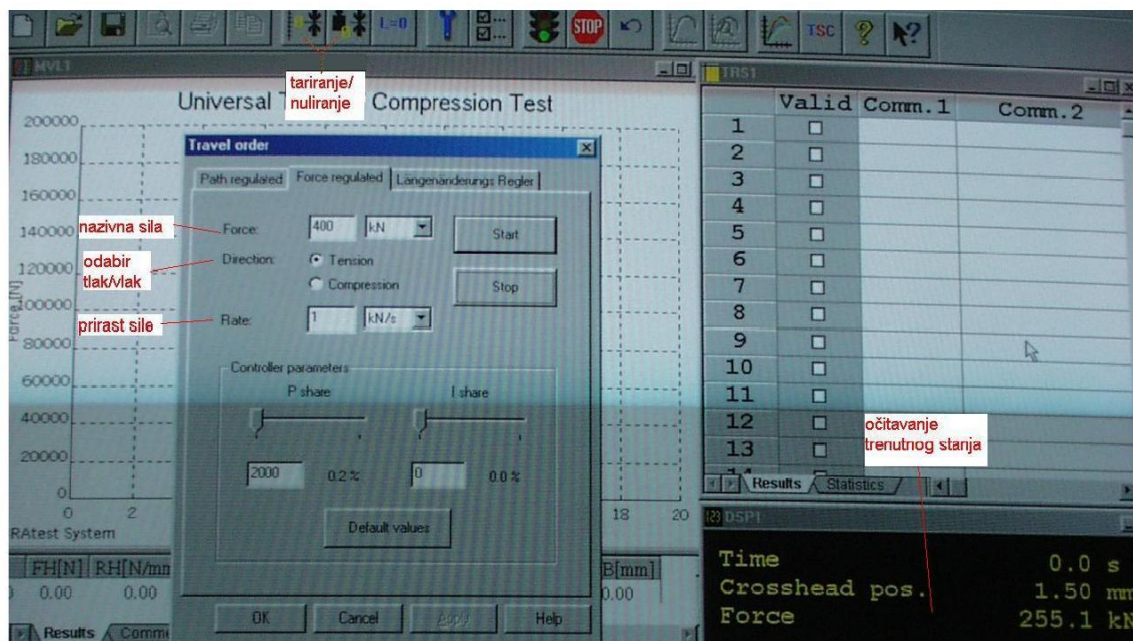


Slika 33. Prenosni tvrdomjer

Kako se vidi na slici instrument ima sondu s pomoću koje se očitava tvrdoća na površini tlačnih ploča. Ovaj instrument je proizvod njemačke firme Krautkramer. Instrument ima i priključak za prenos (eksportiranje) podataka.

Dodatno je potrebno izmjeriti i ravnoću tlačnih ploča pomoću lineala. Ravnoća mora biti takva da na 100 mm nema odstupanja većeg od 0.01 mm, ako nije drugačije specificirano zahtjevima određenog ispitivanja [4].

Nakon ovih mjerenja izvršena je provjera da li je moguće postizati određene vrijednosti sile jednoliko bez naglih skokova tj. bez trzaja. S tim u vezi na slici 34 prikazano je sučelje u kojem se može mijenjati vrijednost sile, brzina prirasta opterećenja i smjer sile.



Slika 34. Sučelje upravljačkog programa kidalice

Zatim je provedeno namještanje pojačala s obzirom na korišteni dinamometar Z4 /500 kN. To su koraci koje treba poduzeti, da bi se počelo mjeriti sa MGCplus-om. Koraci u namještanju mjernog lanca jesu slijedeći:

1. Postavke karakteristične za dinamometar : tip mosta, napon napajanja, k- faktor osjetljivosti
2. Postavke za ugađanje : vrijednost nule, nazivna vrijednost, postavke filtera.
3. Postavke karakteristične za displej: jedinice, decimalna mjesta, raspon skale, korak.

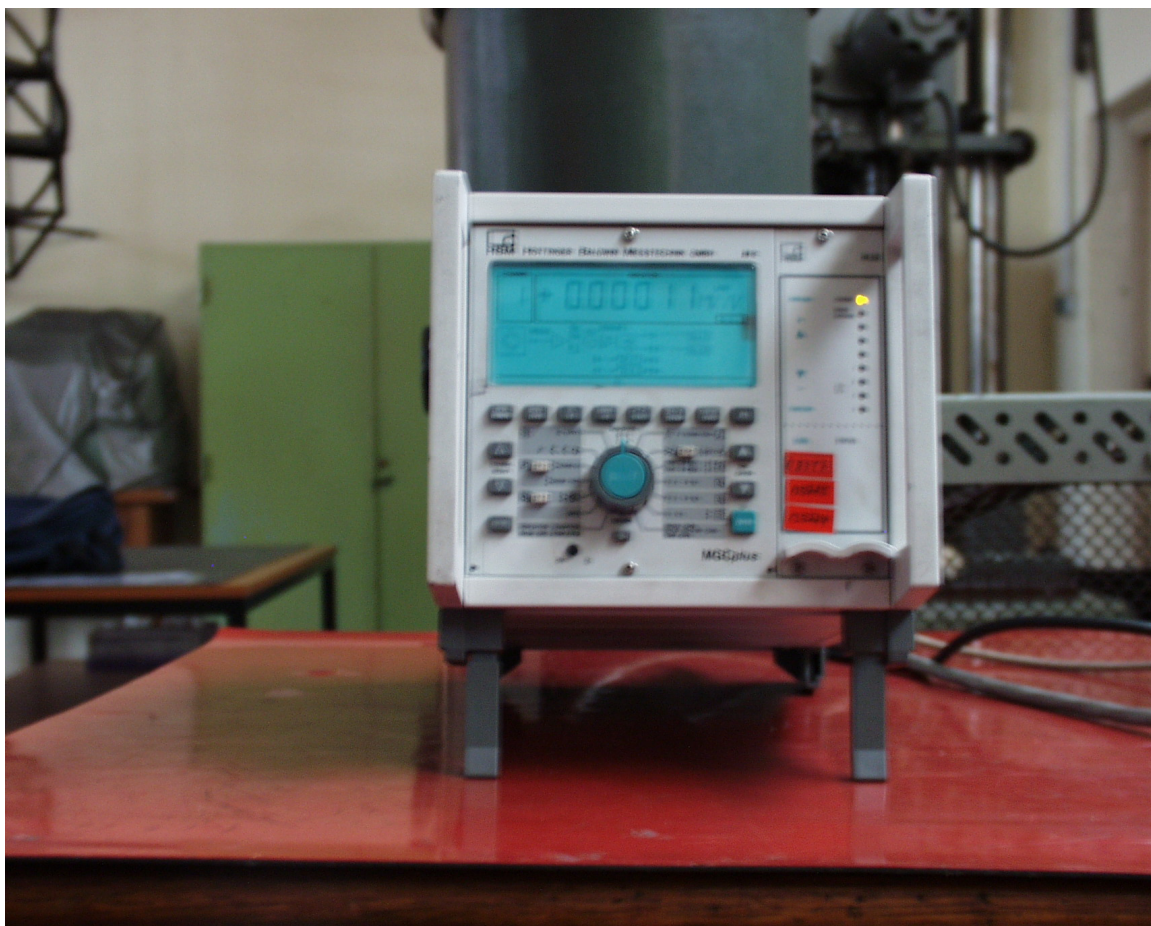
Vrijednost nule i mjerno područje može se postaviti na dva načina:

- a) unošenjem karakteristika dinamometra
- b) direktnim učitavanjem već pohranjenih podataka

Namješteni su slijedeći parametri :

- * napon napajanja Wheatstone-ovog mosta 5 V;
- * cijeli most, 4 mjerne trake;
- * mjerno područje: 2.50000 mV/V, (osiguranje zbog preopterećenja);
- * vrijednost "nule" je postavljena na 0 mV/V;
- * izabrana je mjerna jedinica: mV/V;
- * odabran je korak (tj. rezolucija pojačala) 0.00001 mV/V
- * izabrana je frekvencija 10 Hz, Butterworth filter (zbog bržeg odziva)

Namještanje ovih parametara vrši se pomoću niza tipkala koja se nalaze na prednjoj strani MGCplus-a, slika 35. Namještanje parametara prati se na pokazivaču pojačala.



Slika 35. Pojačalo MGCplus

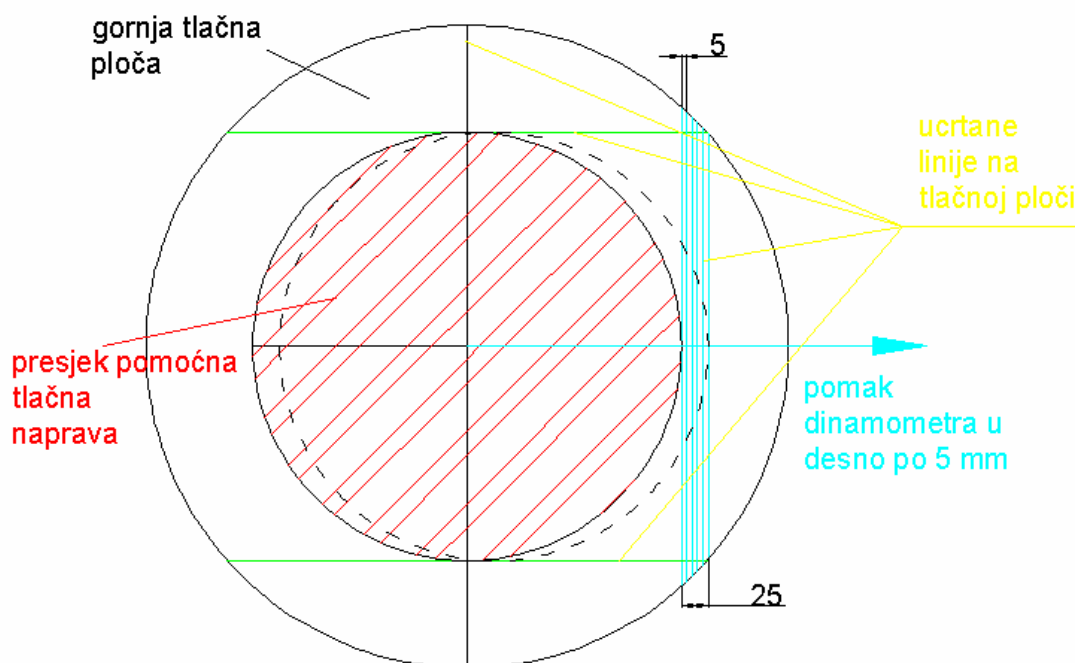
U postupku umjeravanja kidalica se prvo predopterećuje tri puta do vrijednosti nazivne sile 400 kN. Ova predopterećenja su provedena uz brzinu prirasta sile od 10 kN/s. Kod svakog predopterećenja potrebno je zabilježiti vrijednost signala prije opterećivanja, zatim pri vrijednosti maksimalne sile i nakon rasterećenja.

Tablica 7. Vrijednosti izlaznog signala kod predopterećenja

| Udaljenost dinamometra od aksijalne osi opterećenja pd mm | Niz 1 mV/V | Niz 2 mV/V | Niz 3 mV/V |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 0 1,60371 -0,00023 | 0 1,60381 -0,00016 | 0 1,60325 0,00006 |
| 5 | -0,00001 1,60208 -0,00021 | -0,00002 1,60281 0,00024 | 0 1,60299 0,00005 |
| 10 | 0,00003 1,59621 -0,00015 | 0,00002 1,59656 0,00001 | 0 1,59939 0,00005 |
| 15 | 0 1,59412 -0,00025 | 0,00002 1,59726 -0,00008 | 0 1,59744 0,00003 |
| 20 | -0,00006 1,59689 0,00000 | 0,00000 1,59454 0,00004 | 0,00002 1,59315 0,00000 |
| 25 | 0 1,58714 -0,00009 | 0,00001 1,58886 -0,00016 | 0 1,58895 -0,00010 |

Nakon predopterećenja slijede nizovi umjeravanja od čega su tri uzlazna niza sa rastućom ispitnom silom sve do vrijednosti 400 kN, te jedan silazni niz s opadajućom silom od 400 kN prema 0. U svim nizovima se koriste iste vrijednosti sile F_i te se svaki niz sastoji od pet diskretnih sila pravilno raspoređenih u području od 20 % do 100 % nazivne vrijednosti. Prirast sile u uzlaznim nizovima iznosio je 1 kN/s. Kod rasterećenja ova je brzina veća i iznosi 10 kN/s. Prije početka svakog niza umjeravanja potrebno je načiniti nuliranje odnosno vrijednost izlaznog signala na pokazivaču pojačala postaviti na nulu.

U sljedećem koraku dinamometar se pomiče u desno na određenu udaljenost od aksijalne osi opterećenja označenu s **pd** i sljedi potpuno istovjetan postupak umjeravanja. U svrhu pozicioniranja dinamometra, na gornjoj tlačnoj ploči iscrtana je mreža pomoćnih linija radi lakšeg i točnijeg namještanja dinamometra.



Slika 36. Prikaz položaja dinamometra kod umjeravanja

Na slici 36 prikazani su različiti položaji dinamometara pri čemu je udaljenost od centra tlačne ploče iznosila 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm i 25 mm.

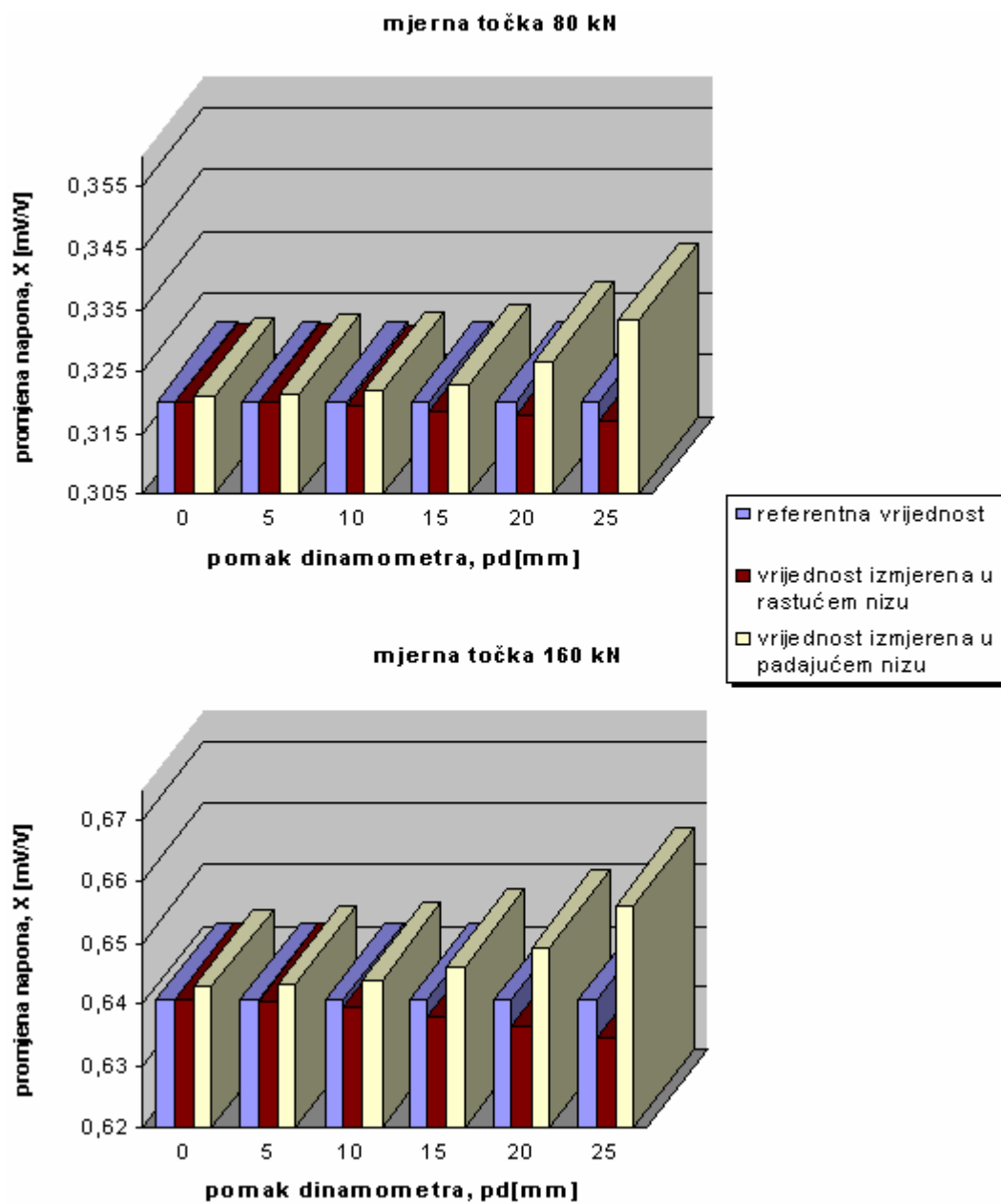
5.1. Rezultati umjeravanja

U tablici 8 navedene su vrijednosti izlaznog signala zabilježene pri mjerenju u različitim nizovima za različite udaljenosti dinamometra od osi opterećenja.

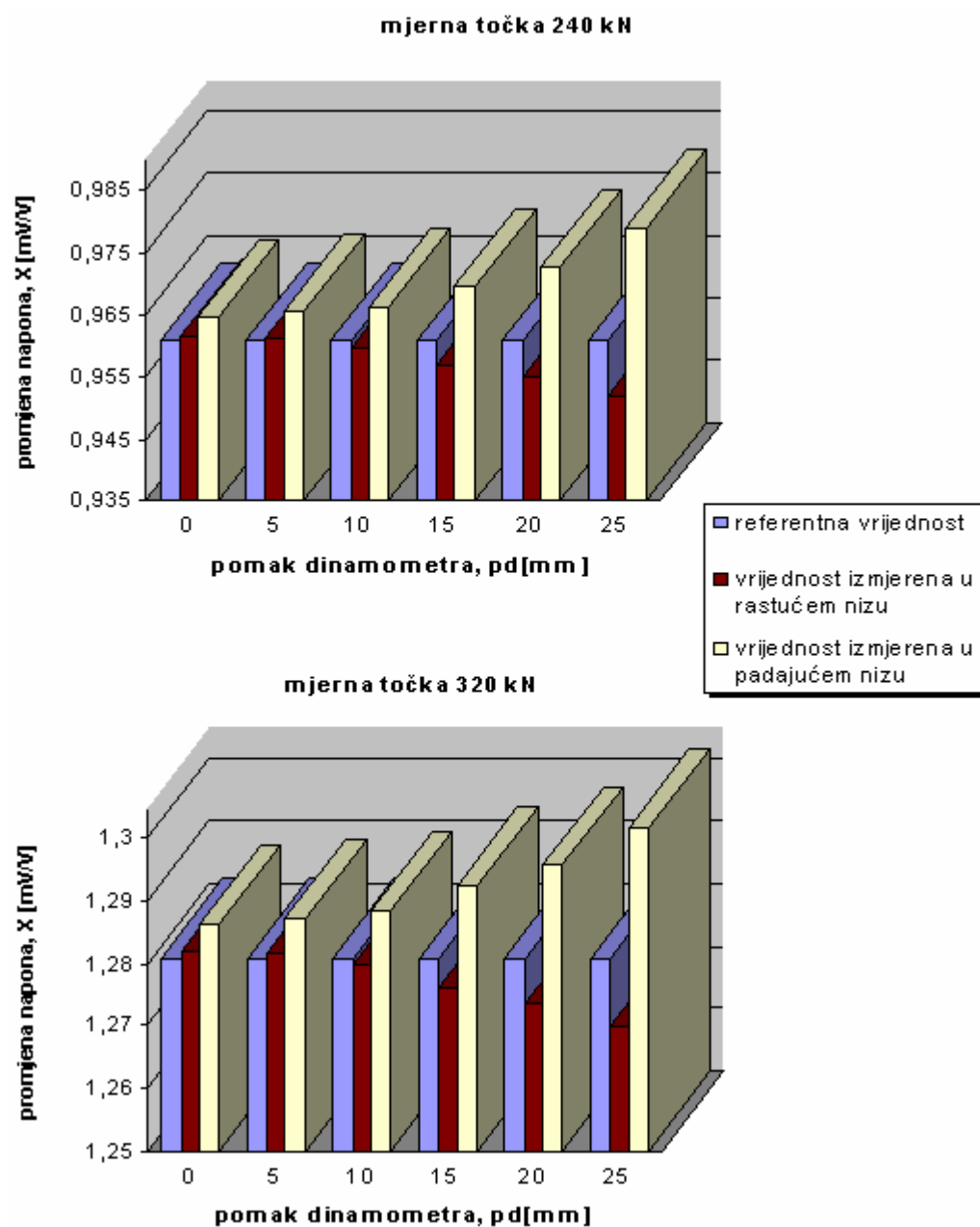
Tablica 8. Rezultati umjeravanja za različite položaje dinamometra

| pd [mm] | Seriya 1 X_1 [mV/V] | Seriya 2 X_2 [mV/V] | Seriya 2" X_2'' [mV/V] | Seriya 3 X_3 [mV/V] |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0,32023 | 0,32014 | 0,32106 | 0,32008 |
| | 0,64066 | 0,64066 | 0,64272 | 0,64054 |
| | 0,96151 | 0,96141 | 0,96449 | 0,96137 |
| | 1,28230 | 1,28197 | 1,28622 | 1,28198 |
| | 1,60285 | 1,60318 | - | 1,60321 |
| 5 | 0,31998 | 0,31997 | 0,32155 | 0,32011 |
| | 0,64040 | 0,64028 | 0,64343 | 0,64055 |
| | 0,96134 | 0,96090 | 0,96548 | 0,96115 |
| | 1,28192 | 1,28141 | 1,28710 | 1,28185 |
| | 1,60287 | 1,60235 | - | 1,60262 |
| 10 | 0,31962 | 0,31956 | 0,32196 | 0,31952 |
| | 0,63938 | 0,63960 | 0,64398 | 0,63948 |
| | 0,95957 | 0,95973 | 0,96625 | 0,95973 |
| | 1,27968 | 1,28014 | 1,28834 | 1,27988 |
| | 1,60006 | 1,60034 | - | 1,60051 |
| 15 | 0,31848 | 0,31878 | 0,32294 | 0,31890 |
| | 0,63709 | 0,63805 | 0,64609 | 0,63800 |
| | 0,95551 | 0,95751 | 0,96939 | 0,95785 |
| | 1,27457 | 1,27660 | 1,29255 | 1,27720 |
| | 1,59348 | 1,59649 | - | 1,59697 |
| 20 | 0,31807 | 0,31837 | 0,32661 | 0,31795 |
| | 0,63624 | 0,63699 | 0,64919 | 0,63606 |
| | 0,95471 | 0,95591 | 0,97247 | 0,95423 |
| | 1,27328 | 1,27457 | 1,29567 | 1,27249 |
| | 1,59289 | 1,59367 | - | 1,59140 |
| 25 | 0,31736 | 0,31721 | 0,33323 | 0,31681 |
| | 0,63410 | 0,63411 | 0,65596 | 0,63519 |
| | 0,95135 | 0,95173 | 0,97884 | 0,95294 |
| | 1,26965 | 1,26892 | 1,30160 | 1,27073 |
| | 1,58770 | 1,58817 | - | 1,58986 |

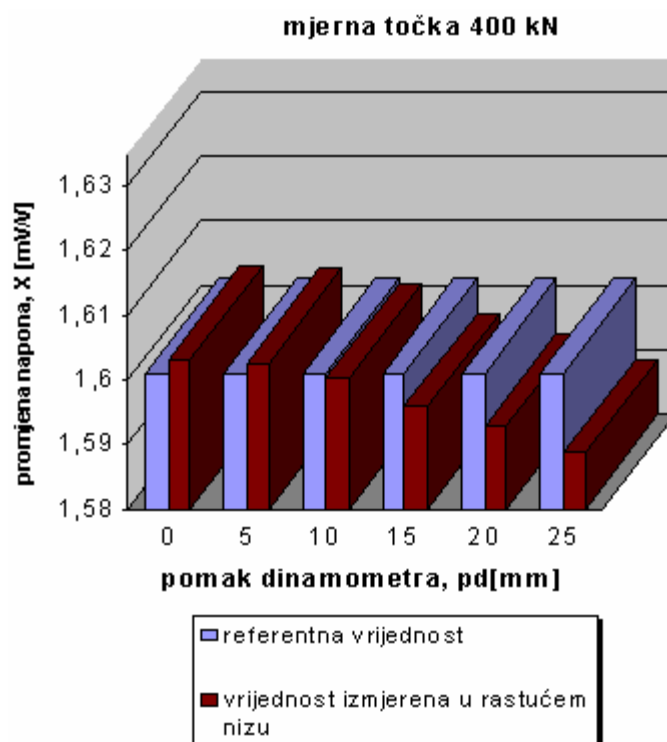
U skladu sa normom DIN EN ISO 7500-1 mjerne točke redom su iznosile 80 kN, 160 kN, 240 kN, 320 kN i 400 kN. Sve vrijednosti su izmjerene pri temperaturi 24,6 °C uz rezoluciju pokazivača $r=0,1$ kN. Referentne vrijednosti promjene napona (X_{REF}) koje odgovaraju vrijednostima diskretnih sila očitanih na pokazivaču sile kidalice redom su iznosile: 0,32029 mV/V, 0,64054 mV/V, 0,96076 mV/V, 1,28093 mV/V i 1,60105mV/V. U svrhu bolje vizualizacije podataka rezultati su prikazani i dijagramski po mjernim točkama, slike 37, 38 i 39 . Na svim mjernim točkama na kojima je provedeno umjeravanje vidljivo je da se vrijednosti izlaznog signala izmjerene u rastućem nizu smanjuju kako se dinamometra udaljava od aksijalne osi opterećenja. Time se naravno povećava razlika između vrijednosti očitanoog signala i referentne vrijednosti koja upravo odgovara diskretnoj sili očitanoj na kidalici. Sasvim suprotna distribucija mjernog signala susreće se u padajućim nizovima kada izmjerene vrijednosti rastu udaljavanjem dinamometra od osi opterećenja.



Slika 37. Vrijednosti izlaznog signala za mjerne točke 80 kN i 160 kN



Slika 38. Vrijednosti izlaznog signala za mjerne točke 240 kN i 320 kN



Slika 39. Vrijednosti izlaznog signala za mjernu točku 400 kN

Iz rezultata mjerenja izračunate su relativne greške kidalice prema izrazima navedenim u poglavlju 4.2 Opis postupka umjeravanja. Greške mjernog sustava sile sistematizirane u tablici 9.

Tablica 9. Vrijednosti relativnih grešaka kidalice

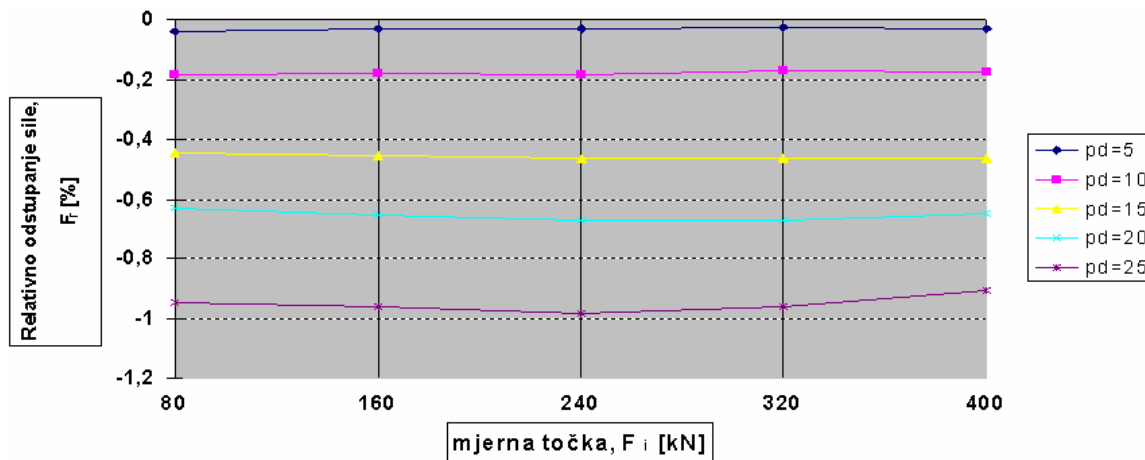
| pd [mm] | F _i [kN] | q [%] | b [%] | v [%] | Niz 1 Niz 2 Niz3 | | |
|------------|------------------------|----------|----------|----------|------------------|------------------------|-----------------|
| | | | | | f ₀₁ | f ₀₂ [%] | f ₀₃ |
| 0 | 80,0 | 0,044 | 0,047 | -0,241 | 0 | 0 | 0 |
| | 160,0 | -0,012 | 0,019 | -0,340 | | | |
| | 240,0 | -0,070 | 0,015 | -0,388 | | | |
| | 320,0 | -0,090 | 0,026 | -0,413 | | | |
| | 400,0 | -0,127 | 0,022 | - | | | |
| 5 | 80,0 | 0,084 | 0,044 | -0,393 | -0,03 | 0 | 0 |
| | 160,0 | 0,020 | 0,042 | -0,451 | | | |
| | 240,0 | -0,038 | 0,046 | -0,491 | | | |
| | 320,0 | -0,062 | 0,040 | -0,481 | | | |
| | 400,0 | -0,097 | 0,032 | - | | | |
| 10 | 80,0 | 0,225 | 0,031 | -0,523 | 0 | 0 | 0 |
| | 160,0 | 0,164 | 0,034 | -0,538 | | | |
| | 240,0 | 0,113 | 0,017 | -0,572 | | | |
| | 320,0 | 0,080 | 0,036 | -0,579 | | | |
| | 400,0 | 0,047 | 0,028 | - | | | |
| 15 | 80,0 | 0,493 | 0,132 | -0,831 | 0 | 0 | -0,03 |
| | 160,0 | 0,444 | 0,151 | -0,870 | | | |
| | 240,0 | 0,397 | 0,245 | -0,902 | | | |
| | 320,0 | 0,377 | 0,206 | -0,911 | | | |
| | 400,0 | 0,338 | 0,219 | - | | | |
| 20 | 80,0 | 0,679 | 0,132 | -1,973 | 0 | 0 | -0,03 |
| | 160,0 | 0,646 | 0,146 | -1,352 | | | |
| | 240,0 | 0,608 | 0,176 | -1,221 | | | |
| | 320,0 | 0,587 | 0,163 | -1,152 | | | |
| | 400,0 | 0,527 | 0,143 | - | | | |
| 25 | 80,0 | 0,996 | 0,173 | -4,080 | 0 | 0 | 0 |
| | 160,0 | 0,957 | 0,170 | -2,430 | | | |
| | 240,0 | 0,919 | 0,167 | -1,899 | | | |
| | 320,0 | 0,879 | 0,143 | -1,628 | | | |
| | 400,0 | 0,785 | 0,136 | - | | | |

Iz tablice je vidljivo da su relativne greške nule uglavnom 0, osim vrijednosti -0,03 koja se javlja u prvom nizu za pd=5 mm i za pd=15 mm i pd=20 mm u trećem nizu.

5.2. Rasprava rezultata umjeravanja

Promjene izlaznog signala izmjerene u rastućim i padajućim nizovima za različite udaljenosti dinamometra od aksijalne osi opterećenja odgovaraju promjeni stvarne sile što je prikazano na slikama 40 i 41.

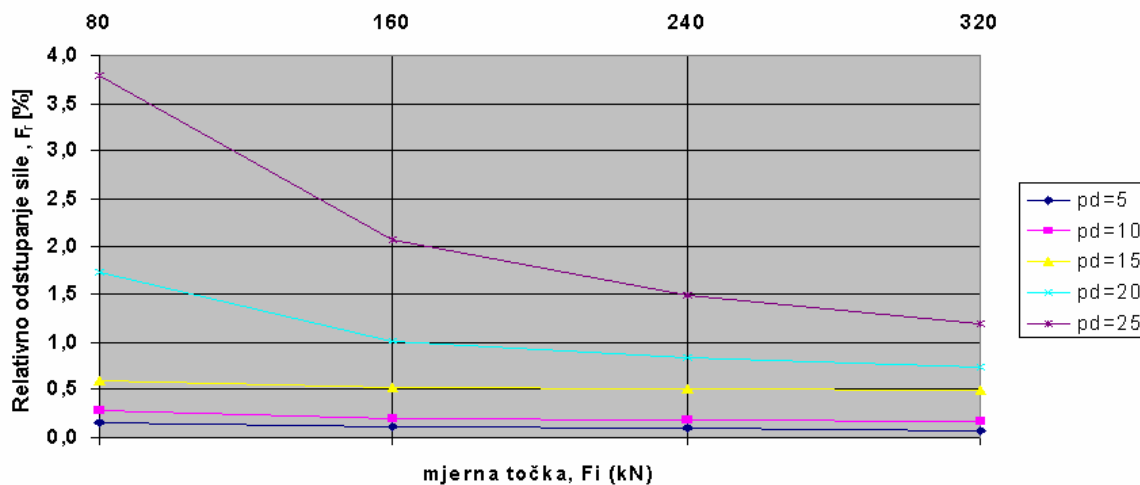
Iz slike 40 je vidljivo da pomakom dinamometra za $pd=5$ mm dolazi do smanjenja stvarne sile u odnosu na onu izmjerenu za $pd=0$ mm. Relativno odstupanje sile pri tom iznosi 0.04 % na svim mjernim točkama na kojima je provedeno umjeravanje.



Slika 40. Relativno odstupanje stvarne sile uslijed izmicanja dinamometra mjereno u uzlaznim nizovima

Za veće pomake dinamometra $pd=10$ mm i $pd=15$ mm izmjerena vrijednost još se više snižava te se sila smanjuje za 0,18 % odnosno 0,45% što su već vrlo značajne promjene. Za još veće udaljenosti dinamometra $pd=20$ i $pd=25$ promjena sile više nije jednoliko izražena po svim mjernim točkama već je najveća razlika zabilježena kod točke 240 kN, a prema kraju mjernog područja odstupanje se ponovno smanjuje. Relativna odstupanja sile (F_r) računata su pomoću srednjih vrijednosti mjerenja u nizovima 1, 2 i 3.

U padajućim nizovima gdje se vrijednosti izlaznog signala, a time i stvarne sile povećavaju izmicanjem dinamometra situacija je sasvim suprotna. U dijagramu na slici 41 prikazane su relativne promjene sile izmjerene u opadajućim nizovima. Evidentno je da izmicanjem dinamometra dolazi do povećanja sile u odnosu na početno stanje $p_d=0$ mm i to na svim mjernim točkama na kojima je provedeno umjeravanje. Relativna razlika je tim veća što je veća udaljenost dinamometra od aksijalne osi opterećenja. Najveće odstupanje javlja se na prvoj mjernoj točki 80 kN posebice ako se radi o velikim pomacima dinamometra $p_d=20$ mm i $p_d=25$ mm. Za veće diskretne sile ta se razlika postepeno smanjuje pokazajući gotovo linearnu tendenciju promjene. U usporedbi s rastućim nizovima ovdje su zabilježene značajno veće promjene sile, naročito ako se radi o nižim mjernim točkama.

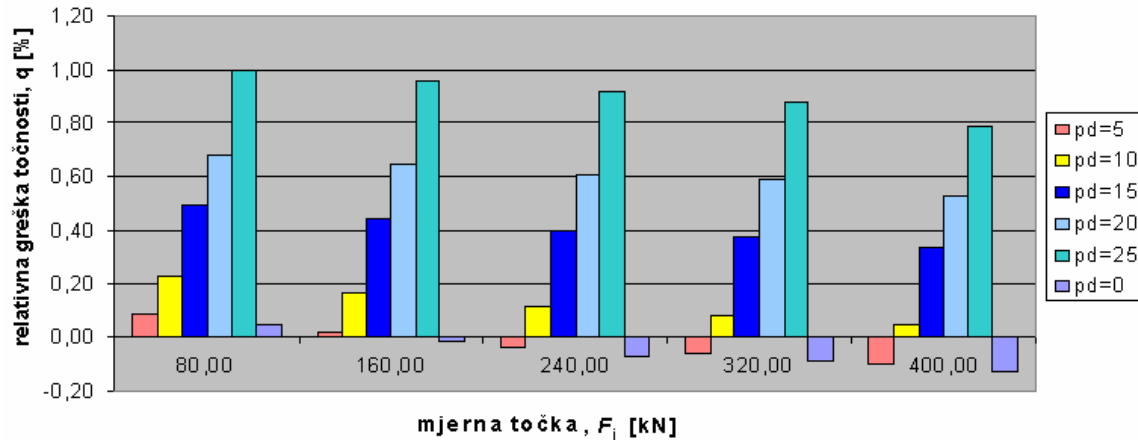


Slika 41. Relativno odstupanje stvarne sile uslijed izmicanja dinamometra mjereno u silaznim nizovima

Ovakva odstupanja sile uzrokuju značajne promjene relativnih grešaka mjernog sustava kidalice.

Na slici 42 dan je prikaz kako se mijenja relativna greška točnosti q na pojedinim mjernim točkama za različite pomake dinamometra p_d . Greška točnosti varira između pozitivnih i negativnih vrijednosti jedino za $p_d=0$ i $p_d=5$ mm i to onda

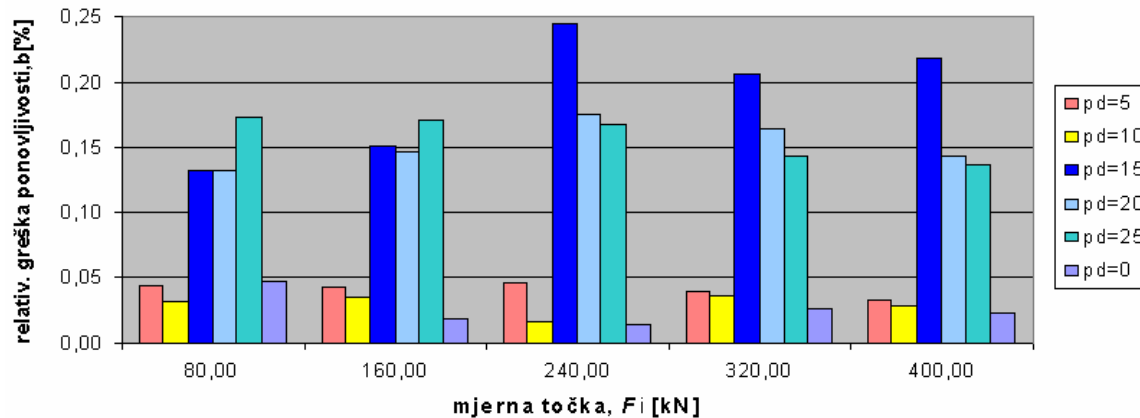
kad sila dosegne cca 50 % nazivne vrijednosti. Pri većim pomacima dinamometra, ova je greška isključivo pozitivna. Razmatranjem vrijednosti relativne greške točnosti po mjernim točkama proizlazi da se u principu ova greška postepeno smanjuje prema kraju mjernog područja. Također je vidljivo da s povećanjem udaljenosti dinamometra od osi opterećenja greška raste i to pri svim silama u području od 80 kN do 400 kN.



Slika 42. Relativna greška točnosti po mjernim točkama za različite pomake dinamometra

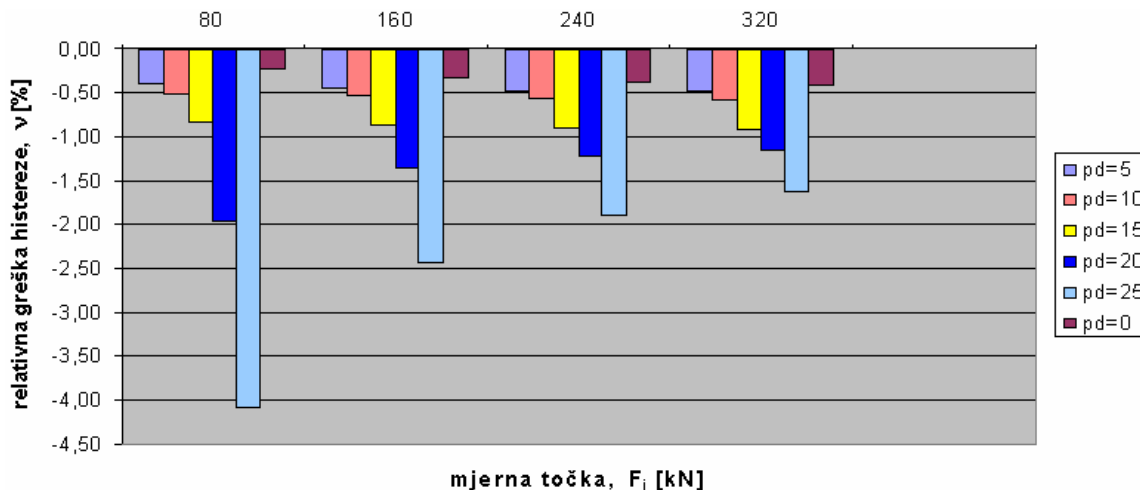
Također dan je i dijagramski prikaz relativne greške ponovljivosti b na slici 43 te dijagramski prikaz greške histerize v na slici 44.

Greška ponovljivosti pri ovom umjeravanju ne prelazi 0,25 % ni na jednoj mjernoj točki i time zadovoljava vrijednost navedenu za klasu točnosti 0,5. Vrijednosti ove greške čak su i manje od 0,05 % kada se radi o manjim pomacima dinamometra ($pd=0$ mm, $pd=5$ mm i $pd=10$ mm). Najlošiji rezultati ponovljivosti, zabilježeni su za $pd=15$ mm kada je na mjernoj točki 240 kN greška ponovljivosti 0,24 %. Sličan trend promjene zabilježen je i za pomak dinamometra $pd=20$ mm pri čemu greška raste do točke 240 kN, a potom lagano pada. Za $pd=25$ mm vrijednosti ove greške postepeno se smanjuju kako se sila približava nazivnoj vrijednosti 400 kN.



Slika 43. Relativna greška ponovljivosti po mjernim točkama za različite pomake dinamometra

Na slici 44 prikazana je relativna greška histereze na mjernim točkama na kojima je provedeno umjeravanje rastućom i opadajućom silom.



Slika 44. Relativna greška histereze po mjernim točkama za različite pomake dinamometra

Vidljivo je da se greška histereze povećava kako se dinamometar udaljava od osi opterećenja. Razmatranjem greške histereze po mjernim točkama proizlazi da je ova greška približno konstantnog iznosa unutar cijelog umjeravanog područja, za udaljenosti $p d$ manje od 20 mm. Za veće udaljenosti greška histereze postepeno se smanjuje kako sila raste, što je osobito izraženo za udaljenost $p d = 25$ mm.

6. ZAKLJUČAK

Izmicanjem dinamometra od aksijalne osi opterećenja dolazi do promjene izlaznog signala, a time i stvarne sile. U uzlaznim nizovima mjerenja vrijednost izlaznog signala se smanjuje s povećanjem udaljenosti dinamometra od centra opterećivanja, dok u silaznim nizovima vrijednost raste udaljavanjem dinamometra.

Ove promjene izlaznog signala odnosno mjerene stvarne sile značajno utječu i na karakteristične greške mjernog sustava kidalice. S tim u vezi greška točnosti raste na svim mjernim točkama kako se dinamometar udaljava od osi opterećenja. Razmatranjem ove greške po točkama umjeravanja može se zaključiti da se ona postepeno smanjuje prema kraju mjernog područja što je osbito izraženo za veće odaljenosti $pd=15$ mm, $pd=20$ mm i $pd=25$ mm.

Greška histereze također raste udaljavanjem dinamometra od osi opterećenja i to na svim mjernim točkama na kojima je provedeno umjeravanje s ratucom i opadajućom silom. Za manje udaljenosti dinamometra $pd=5$ mm, $pd=10$ mm i $pd=15$ mm greška histereze je približno konstantnog iznosa unutar cijelog ispitivanog područja, dok je za udaljenosti $pd=20$ mm i $pd=25$ mm greška najveća na prvoj mjernoj točki 80 kN i postepeno se snižava na višim mjernim točkama.

Što se tiče greške ponovljivosti treba istaknuti da je ona vrlo mala, niža od 0,25 %, za sve mjerne točke i ispitivane udaljenosti. Kod ove greške nije jasno izražen trend njene promjene unutar ispitivanog mjernog područja odnosno s obzirom na različite udaljenosti dinamometra od centra opterećivanja.

Pri manjim pomacima dinamometra ($pd=5$ mm, $pd=10$ mm) promjena karakterističnih grešaka mjernog sustava kidalice je relativno prihvatljiva jer su rezultati iako pogoršani još uvijek ostali u okvirima u kojima se kidalicu može ocjeniti kao uređaj klase 0,5. Kod svih ostalih pomaka, uočena je stanovita degradacija klase kidalice. Tako je za udaljenost $pd=15$ mm klasa umjeravane

kidalice 1 dok je za veće udaljenosti $p_d=20$ mm i $p_d=25$ mm ona još lošija i kidalica se svrstava u razred 2 odnosno 3. Na pogoršanje klase najviše utječe greška histereze.

Na temelju svega iznesenog može se zaključiti da je u postupku umjeravanja kidalice vrlo bitno pravilno pozicionirati dinamometar tako da se on nalazi upravo u centru djelovanja opterećenja. Time se postižu valjani rezultati umjeravanja koji daju ispravnu sliku o točnosti ispitivanog mjerila.

Literatura

- [1] M. Franz: "Mehanička svojstva materijala", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, studeni 1998.
- [2] Praktičar 2, Strojarsvo 1, skupina autora, "Školska knjiga", Masarykova 28, travanj 1972.
- [3] HBM ON TOUR 2006, Bosnia Herzegovina, Croatia, Serbia, Promotivni CD od HBM-a
- [4] D. Ćorić, T. Aleksandrov, M. Franz, Utjecaj nagiba dinamometra na rezultate umjeravanja, znanstveni rad u izradi
- [5] INTERNATIONAL STANDARD ISO 7500-1, Second edition 1999-09-01
- [6] "The Route to Measurement Transducers- A Guide to the Use of the HBM K Series Foil Strain Gauges and Accessories", Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1991
- [7] www.fsb.hr/NewsUpload/30_09_2006_4827_Materijali_I_treci_dio.pdf
- [8] <http://www.pomacom.unze.ba/pdf/>
- [9] <http://www.admet.com/assets/>
- [10] <http://www.directindustry.com/prod/>
- [11] http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/html/
- [12] www.zik.hr
- [13] www.hbm.com
- [14] <http://www.fsb.hr/index.php?p=810&v=1>

- [15] http://spus.zesoi.fer.hr/projekt/2001_2002/ceperic-petrovic
- [16] www.12tesla.phy.hr/elprakt/materijali/9.pdf